



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO
CONVENCIONAL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
BENEFICIAMENTO DE ÁGATA EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO
AGREGADO MIÚDO**

Carolina Bernhard

Lajeado, junho de 2018

Carolina Bernhard

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO
CONVENCIONAL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
BENEFICIAMENTO DE ÁGATA EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO
AGREGADO MIÚDO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Ms. Débora Pedroso Righi.

Lajeado, junho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial meus pais, Gerson e Laís, e meus avós maternos, Paulo e Selma, pela compreensão e apoio em todos os momentos difíceis e de ausência em que eu passei durante esta pesquisa. Agradeço também ao meu namorado, Leonardo, pela cumplicidade, ajuda e palavras de motivação, bem como à minha amiga, Diandra, que me acompanhou durante toda a graduação.

Agradeço a minha orientadora Ms. Débora Pedroso Righi pela confiança que depositou em mim desde o primeiro momento em que lhe apresentei a proposta desta pesquisa. Agradeço ao carinho que tiveste comigo, e à amizade que conquistamos ao longo desta caminhada. Tenho muito orgulho de ter sido aceita como sua aluna de TCC, e saibas que será sempre o meu exemplo.

Agradeço a Dra. Eniz Conceição Oliveira por ter me aceito como sua aluna no projeto de pesquisa, no qual este trabalho está relacionado, e por confiar no meu potencial como aluna e pesquisadora. Agradeço também a colega de bolsa Larissa, por me auxiliar na realização de parte do trabalho experimental desta pesquisa.

Agradeço a Arq. Daniela Vescovi por me incentivar em todos os momentos da minha graduação, por me dar a oportunidade de começar uma vida profissional, e permitir a minha ausência em alguns momentos durante a realização deste trabalho.

Agradeço às indústrias beneficiadoras de pedras preciosas em Teutônia - RS, Caye Pedras e Pedras Orientes, por abrirem suas portas e colaborarem para o andamento deste estudo.

Agradeço aos colegas, Daniel e Mirela, também orientados pela Ms. Débora, pela colaboração e parceria na realização conjunta de ensaios característicos de agregados no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC). E, ao colega e amigo Adriano, por me auxiliar na moldagem de corpos de prova de concreto no LATEC e por compartilhar sonhos e interesses acadêmicos comigo.

E por fim, agradeço aos funcionários do LATEC, Rodrigo e Viane, por sempre estarem dispostos a auxiliar os alunos nos procedimentos práticos ligados às atividades disciplinares ou de pesquisa.

RESUMO

No Rio Grande do Sul o grande número de jazidas de ametistas e ágatas favorece o desenvolvimento da mineração, beneficiamento e comercialização destas Pedras. Porém, as indústrias de beneficiamento de pedras detêm baixa capacidade tecnológica, o que por consequência, gera inúmeros resíduos durante a cadeia de produção, como pó de pedras e fragmentos oleosos. Inicialmente, esta pesquisa buscou testar a capacidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de ágata de uma indústria de Teutônia, RS. Foram realizados testes iniciais de caracterização física do material, como granulometria, quantidade de finos, massa específica e unitária, e desempenho com cimento *Portland*; e caracterização química, como identificação da composição química, mineralógica e quantidade de óleos. O resíduo apresentou índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias de 62,235%, resultado que se encontra abaixo do mínimo de 90% exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Não constatada as propriedades cimentícias do material, a pesquisa seguiu para a avaliação da substituição parcial da areia convencional pelo resíduo de beneficiamento para a produção de concreto. Foram definidos 6 traços de concreto com teores de 0%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de resíduo em substituição à areia, os quais foram misturados no Laboratório de Tecnologias da Univates (LATEC). Para identificação do desempenho deste concreto foram identificadas a consistência pelo abatimento no tronco de cone (*Slump Test*) e a massa específica do concreto no estado fresco; também foram realizados ensaios de compressão, tração, absorção de água por capilaridade, índice de vazios e resistência à abrasão, para estado endurecido. Os resultados não indicaram ganho de resistência à compressão para os traços com incorporação do resíduo, porém o traço com 10% do material obteve resistência aos 56 dias de 40,31 MPa, o qual se aproxima dos 41,81 MPa do concreto referência. Todos os valores de resistência à tração se equivalem, considerando os desvios padrão, ao valor de 3 MPa. No entanto o resíduo favoreceu o aumento da resistência ao desgaste abrasivo; a redução da absorção de água em 59,3% para as misturas com 7,5%; a redução do índice de vazios acompanhou a redução na absorção, mostrando que estes dois últimos parâmetros são diretamente proporcionais. O óleo remanescente do processo de beneficiamento não se manifestou em valores que enquadram o produto final em classes de risco ambiental, de modo que estes concretos, devido ainda à finura do material, possibilitam o incremento da durabilidade das peças pela redução da entrada de agentes agressivos.

Palavras-chave: Resíduo de beneficiamento de ágata. Capacidade pozolânica. Concreto.

ABSTRACT

In Rio Grande do Sul, the large number of amethyst and agate deposits favors the development of mining, processing and marketing of these stones. However, the stone processing industries have low technological capacity, which consequently generates numerous wastes during the chain such as stone powder and oily fragments. Initially, this research sought to test the pozzolanic capacity of the agate beneficiation residue of an industry in Teutônia, RS. Initial tests were performed for the physical characterization of the material, such as granulometry, quantity of fines, specific and unit mass, and performance with Portland cement; and chemical characterization, such as identification of chemical composition, mineralogy, and quantity of oils. The residue presented a performance index with Portland cement at 28 days of 62.235%, a result that is below the minimum of 90% required by NBR 12653 (ABNT, 2014). Once the cement properties of the material were not verified, the research followed the evaluation of the partial substitution of the conventional sand by the beneficiation residue for the concrete production. Six traces of 0%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15% of sand substitute were mixed in the Laboratory of Technologies of Univates (LATEC). In order to identify the performance of this concrete, it was identified the consistency of the slump test (Slump Test) and the specific mass of the concrete in the fresh state; tests of compression, traction, water absorption by capillarity, voids index and abrasion resistance were also performed for hardened state. The results did not indicate a gain of compressive strength for the traces with incorporation of the residue, but the trace with 10% of the material obtained resistance at 56 days of 40,31 MPa, which approximates the 41,81 MPa of the reference concrete. All values of traction strength are equivalent, considering the standard deviations, to the value of 3 MPa. However, the residue favored increased resistance to abrasive attrition; the reduction of water absorption by 59.3% for mixtures with 7.5%; the reduction of the voids index followed the reduction in the absorption, showing that these last two parameters are directly proportional. The remaining oil from the beneficiation process did not manifest itself in values that fall into the final product in environmental risk classes, so that this concrete, due to the fineness of the material, can increase the durability of the parts reducing the entry of aggressive agents.

Keywords: Agate beneficiation residue. Pozolanic capacity. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ágatas e ametistas.....	24
Figura 2 - Mapa Gemológico da Região Sul do Brasil.....	24
Figura 3 - Fluxograma dos processos de beneficiamento de gemas e geração de resíduos	27
Figura 4 - Resíduo de beneficiamento de ágata.....	28
Figura 5 - Serra caixão.....	29
Figura 6 - Resíduos depositados no pátio da empresa.....	29
Figura 7 - Fluxograma de ensaios.....	39
Figura 8 – Peneiramento do agregado miúdo	41
Figura 9 - Areia em condição de saturação com superfície seca.....	42
Figura 10 - Procedimento para determinação da massa específica da areia.....	43
Figura 11 - Procedimento para determinação da massa unitária da areia	44
Figura 12 - Peneiramento do agregado graúdo.....	45
Figura 13 - Procedimento para determinação da massa unitária da brita.....	47
Figura 14 - Brita em condição de saturação com superfície seca.....	47
Figura 15 - Procedimento para determinação da massa específica da brita	48
Figura 16 - Processo de retirada de óleos do resíduo	49
Figura 17 - Quarteamento da amostra de resíduo de beneficiamento de ágata para ensaios de laboratório.....	50
Figura 18 - Sistema de extração <i>Soxhlet</i>	51
Figura 19 - Dissecador para atingir a temperatura ambiental.....	51
Figura 20 - Conjunto de peneiras utilizadas para ensaio granulométrico com o resíduo de beneficiamento de ágata	54

Figura 21 - Interação do raio de luz com uma partícula esférica resultando em ângulos difratados	55
Figura 22 - Lavagem da amostra	56
Figura 23 - Procedimento para determinação da massa unitária do resíduo	57
Figura 24 - Materiais necessários à realização do ensaio da massa específica do resíduo de beneficiamento de ágata	57
Figura 25 - Materiais dentro do frasco de <i>Le Chatelier</i>	58
Figura 26 - Materiais utilizados para cada mistura de argamassa	59
Figura 27 - Frações granulométricas da areia utilizadas para ensaio	60
Figura 28 - Misturador utilizado para amassamento de argamassas	60
Figura 29 - Mesa para índice de consistência, <i>flow table</i>	61
Figura 30 - Corpos de prova para teste de resistência e verificação do índice de desempenho	62
Figura 31 - Ruptura de corpo de prova de argamassa em prensa hidráulica	63
Figura 32 - Medida do abatimento	65
Figura 33 - Corpos de prova	66
Figura 34 - Ruptura dos corpos de prova de concreto em prensa hidráulica.....	67
Figura 35 - Resistência à compressão por tração diametral	67
Figura 36 - Corpos de prova na estufa $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$	68
Figura 37 - Determinação da absorção de água por capilaridade.....	69
Figura 38 - Corpos de prova imersos em água	70
Figura 39 - Fervura de corpos de prova.....	70
Figura 40 - Moinho de bolas para ensaio de resistência à abrasão.....	72
Figura 41 - Difratoograma por raios X do material analisado.....	75
Figura 42 - Difratoograma por raios X do material de comparação.....	75
Figura 43 - Geodo com ágata	76
Figura 44 - Perda de massa nos corpos de prova após ensaio de abrasão	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição dos empregados formais no Brasil em torno das atividades industriais do setor de gemas no ano de 2010.....	25
Tabela 2 - Características dos corpos de prova após a queima com a incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata.....	31
Tabela 3 - Limites de módulo de finura	33
Tabela 4 - Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo	34
Tabela 5 - Limites granulométricos para classificação da pedra britada.....	35
Tabela 6 - Requisitos para caracterizar um material pozzolânico.....	37
Tabela 7 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	41
Tabela 8 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo	46
Tabela 9 - Quantidade mínima de amostra para ensaio.....	55
Tabela 10 - Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova cilíndricos	59
Tabela 11 - Frações granulométricas da areia para o ensaio da NBR 5752 (ABNT, 2014).....	59
Tabela 12 - Traços unitário definidos para estudo	63
Tabela 13 - Traço em massa para moldagem de 28 corpos de prova.....	64
Tabela 14 - Composição química da amostra de resíduo de beneficiamento de ágata	75
Tabela 15 - Distribuição granulométrica do resíduo de beneficiamento de ágata	77
Tabela 16 - Características granulométricas encontradas para o resíduo de beneficiamento de ágata por meio de análise com raio <i>laser</i>	78
Tabela 17 - Valores para ensaio de massa específica aparente com o resíduo de beneficiamento de ágata	79

Tabela 18 - Valores característicos do resíduo de beneficiamento de ágata em comparação com referência da norma NBR 12653 (ABNT, 2014).....	79
Tabela 19 - Valores de consistência	81
Tabela 20 - Massa específica do concreto	82
Tabela 21 - Absorção de água em diferentes condições de saturação.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de Cimento Portland disponíveis no Brasil	32
Quadro 2 - Limites granulométricos para agregado graúdo analisado	46
Quadro 3 - Valores de consistência obtidos na mesa de espalhamento, <i>flow table</i>	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores de resistência à compressão encontrados para <i>pavers</i> produzidos com a incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata.....	30
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	42
Gráfico 3 - Curva granulométrica do resíduo de beneficiamento de ágata	77
Gráfico 4 - Análise granulométrica por raio <i>laser</i>	78
Gráfico 5 - Resistência à compressão para diferentes idades do teste de desempenho com cimento <i>Portland</i>	81
Gráfico 6 - Resistência a compressão simples para os corpos de prova de concreto	83
Gráfico 7 - Resistência a tração por compressão diametral para os corpos de prova de concreto	84
Gráfico 8 - Absorção por capilaridade para os corpos de prova de concreto	85
Gráfico 9 - Relação entre absorção de água e índice de vazios.....	86
Gráfico 10 - Resistência ao desgaste por abrasão do concreto.....	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
a/c	Relação de água e cimento
cm ³	Unidade de volume, centímetro cúbico
cm	Unidade de medida, centímetro
CP	Cimento Portland
DMC	Diâmetro Máximo característico (ou nominal)
dm ³	Unidade de volume, decímetro cúbico
DRX	Difração por Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
g	Unidade de massa, gramas
h	Unidade de tempo, hora
kg	Unidade de massa, quilograma
L	Unidade de volume, litro
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LATEC	Laboratório de Tecnologia da Construção
MF	Módulo de finura
mm	Unidade de medida, milímetros
MPa	Unidade de força/resistência em Mega Pascals

N	Unidade de força, Newton
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma do Mercosul
rpm	Unidade de velocidade, rotações por minuto
RS	Rio Grande do Sul
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SiO ₂	Dióxido de silício
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
µm	Unidade de medida, micrômetro
°C	Unidade de temperatura, graus Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações iniciais	17
1.2 Objetivo geral.....	19
1.3 Objetivos específicos.....	19
1.4 Justificativa	20
1.5 Delimitações da pesquisa	21
1.6 Estrutura do trabalho	21
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Potencial gemológico do Rio Grande do Sul	23
2.1.1 A indústria do beneficiamento de gemas no Vale do Taquari.....	26
2.1.2 Resíduo de beneficiamento de ágata	28
2.1.3 A construção civil como alternativa para o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas e semipreciosas	29
2.2 Concreto	31
2.2.1 Cimento <i>Portland</i>	31
2.2.3 Agregados	32
2.2.4 Adições.....	36
2.2.5 Aditivos	37
2.2.6 Água	37
 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1 Cimento	39
3.2 Água de amassamento	40

3.3 Agregado Miúdo	40
3.3.1 Determinação Granulométrica.....	40
3.3.2 Determinação da massa específica e massa unitária	42
3.4 Brita	45
3.4.1 Determinação Granulométrica.....	45
3.4.2 Determinação da massa específica e massa unitária	46
3.5 Aditivo Superplastificante	48
3.6 Resíduo de beneficiamento de ágata	49
3.6.1 Características químicas	50
3.6.2 Características físicas	53
3.7 Dosagem.....	63
3.8 Determinação da consistência do concreto no estado fresco	65
3.8.1 Moldagem dos corpos de prova.....	65
3.9 Ensaio para concreto no estado endurecido	66
3.9.1 Resistência à compressão simples	66
3.9.2 Resistência à tração	67
3.9.3 Determinação da absorção de água por capilaridade	68
3.9.4 Determinação da absorção de água por imersão	69
3.9.5 Determinação da resistência à abrasão	71
3.9.6 Determinação do teor de óleo	73
 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	 74
4.1 Características químicas do resíduo de beneficiamento de ágata	74
4.1.1 Extração de óleo.....	74
4.1.2 Composição química e mineralógica.....	75
4.2 Características físicas do resíduo de beneficiamento de ágata.....	76
4.2.1 Análise granulométrica	76
4.2.2 Índice de atividade pozolânica	79
4.3 Características do concreto com resíduo de beneficiamento de ágata	81
4.3.1 Consistência pelo abatimento	81
4.3.2 Massa específica	82
4.3.3 Resistência à compressão simples	82
4.3.4 Resistência à tração por compressão diametral.....	83
4.3.5 Capilaridade.....	84
4.3.6 Absorção de água e índice de vazios (porosidade).....	85
4.3.7 Abrasão.....	87
4.3.8 Indicação de óleo.....	88

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
--	-----------

REFERÊNCIAS	92
--------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O crescimento industrial em resposta à expansão populacional se desenvolve em sua maioria a partir da exploração dos recursos naturais. Para atender a demanda de mercado, os vários processos de transformação da matéria-prima geram inúmeros resíduos no decorrer da produção. Em muitos casos, esses resíduos são descartados de forma inadequada, e sem tratamento adequado, podendo causar a contaminação do solo e dos lençóis freáticos.

Os problemas ambientais causados pelos resíduos são de responsabilidade das indústrias. Diante desta preocupação, crescentemente o setor industrial tem buscado alternativas para seu descarte adequado. A gestão correta dos resíduos é um desafio em muitos setores, pois, ao mesmo tempo em que existe a necessidade de demonstrar uma postura ecologicamente correta perante o mercado, o descarte dos materiais pode ser dispendioso e complexo. Assim, muitos empresários procuram reutilizar seus resíduos como matérias-primas para a própria produção, ou então buscam revertê-los em subprodutos com valor agregado para que possam servir de matéria-prima para outros setores da indústria (BRUXEL et al., 2012).

Nesse contexto, para John (2011) a engenharia é capaz de corresponder às necessidades de uma população crescente e ainda reduzir danos ambientais por meio de soluções alternativas. Na construção civil, um dos setores mais importantes para o desenvolvimento do País, a questão de reaproveitar resíduos próprios ou secundários incita muitas pesquisas e influencia as atividades tecnológicas. O concreto com agregados

reciclados desenvolveu-se como uma solução aos resíduos de construção e demolição, os quais são fragmentos de concreto, cerâmica e argamassa que antes eram descartados. Na tecnologia do concreto ainda existem estudos sobre a utilização de resíduos oriundos de outras áreas de produção, como a adição de cinza de casca de arroz, por Pereira et al. (2015), e também adição de resíduos de borracha de pneu, por Silva Júnior et al. (2016).

A procura pela reutilização de resíduos também está presente na indústria de beneficiamento de pedras. A diversidade e quantidade de pedras preciosas e semipreciosas encontradas no Brasil fazem do País o maior fornecedor e exportador do mundo. O Estado do Rio Grande do Sul (RS) contribui para este posto, pelo fato de possuir o maior número de minas de extração, em especial de ágatas e ametistas (JUCHEM et al., 2009). No entanto, a grande quantidade de garimpos existentes no Sul do País não conta com qualidades tecnológicas e processos automatizados de beneficiamento, fatos que dificultam a produtividade e ocasionam perdas que se aproximam a 30 e 40% da matéria-prima (BRUXEL et al., 2012). Os resíduos geralmente não seguem gerenciamento efetivo, sendo que há dificuldade por parte das indústrias de beneficiamento em fornecer um descarte correto a esses materiais, os quais ficam estocados nos pátios das empresas ou são encaminhados para aterros sanitários.

O interesse em proporcionar um destino distinto para os resíduos do beneficiamento, em especial o resíduo de beneficiamento de ágata, já foi pauta de pesquisas anteriores. Bruxel et al. (2012) analisou a adição de resíduo de beneficiamento de ágata na massa cerâmica vermelha para fabricação de tijolos. Bildhauer et al. (2015) analisou o comportamento de tijolos refratários com incorporação de fragmentos de mármore e granitos, materiais que também se encontram dentro do setor de gemas. E, recentemente, a pesquisa realizada por Giovanella (2017), diz respeito à influência do resíduo de beneficiamento de ágata em pisos intertravados de concreto (*pavers*) quando em substituição ao agregado miúdo. Sendo que os *pavers*, cujo traço continha o resíduo de beneficiamento de ágata, em comparação a um traço padrão, apresentaram melhorias finais, como diminuição da absorção de água e aumento na resistência à compressão.

Todas as pesquisas citadas acima apresentam soluções desenvolvidas em um setor comum: a engenharia civil. O fato se explica, primeiramente, pois segundo Bruxel et al. (2012), os resíduos do beneficiamento de pedras preciosas e semipreciosas, pó de pedra, lodo e fragmentos de peças, se assemelham aos materiais cerâmicos, cujos componentes

predominantes, sílica e alumina, são os mesmos encontrados em muitos agregados utilizados na construção civil; e segundo, pois as matérias-primas utilizadas para fabricar os materiais de construção necessitam ser retiradas da natureza, e na mesma medida que reduzem os recursos minerais naturais também demandam altos gastos energéticos de extração e tratamento.

A utilização do resíduo de beneficiamento de ágata pode ser vista como um material não convencional na produção de elementos da construção civil. Os poucos trabalhos de pesquisa são recentes, fazendo com que este resíduo ainda permaneça desconhecido dentro da área da engenharia e desenvolvimento de materiais. Seguindo o intuito de conferir destino aos resíduos de beneficiamento, esta pesquisa tem por finalidade avaliar a viabilidade técnica da incorporação de resíduo de beneficiamento de ágata na massa de concreto convencional. A fim de atribuir características sustentáveis ao concreto, buscar-se-á a utilização combinada entre o resíduo de beneficiamento de ágata e os agregados. O intuito da incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata no concreto, não é tê-lo como uma nova adição mineral, mas sim como um componente que possa vir a fazer parte do traço do concreto, reduzindo, portanto a utilização dos agregados miúdos convencionais.

1.2 Objetivo geral

Testar a viabilidade da utilização do resíduo de beneficiamento de ágata no concreto, com o intuito de se obter um produto com características melhoradas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, porém que mantenha propriedades satisfatórias quando em comparação a um traço padrão de concreto de Cimento *Portland*.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são um conjunto de etapas mínimas a serem realizadas e questões a serem verificadas, com o intuito de possibilitar o alcance do objetivo geral deste trabalho, portanto, definem-se em:

- a) Estudar a influência da porcentagem de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de beneficiamento de ágata em proporções de: 5, 7,5, 10, 12,5, 15%;

- b) Caracterizar os materiais a serem utilizados no concreto, ou seja, caracterizar fisicamente os agregados, a fim de enquadrá-los nas especificações da ABNT;
- c) Caracterizar física e quimicamente o resíduo de beneficiamento de ágata, bem como determinar a quantidade de hidrocarbonetos, a fim de comparar com a classe E dos materiais pozolânicos da NBR 12653 (ABNT, 2014);
- d) Identificar se o resíduo de beneficiamento de ágata possui atividade pozolânica por meio do índice de desempenho aos 28 dias;
- e) Verificar as propriedades mínimas do concreto com a utilização do resíduo de beneficiamento de ágata em estado fresco por meio do *Slump Test*, e estado endurecido por meio de ensaios de resistência à tração e compressão, e compará-las ao traço padrão.

1.4 Justificativa

Os agregados se constituem em cerca de 85% da massa dos produtos cimentícios. [...] são constituídos de rochas naturais e areia, submetidos a baixo processamento industrial, com consumo de explosivos, combustível na operação de máquinas de extração e transporte e energia de britagem, no caso de produtos britados. [...] os principais impactos associados ao uso de agregados naturais são decorrentes da atividade extrativa, com a destruição do bioma local e das emissões da etapa de transporte (JOHN, 2011, p. 1853).

A partir desta afirmativa a construção civil se torna uma alternativa para o emprego de resíduos de outros setores industriais. Por meio de estudos de viabilidade, vários resíduos podem ser aplicados em massas cerâmicas ou em concretos. Evitando-se a extração de agregados naturais torna-se possível a economia dos recursos energéticos e a redução de gases nocivos ao meio ambiente.

A questão das perdas dentro do setor industrial de beneficiamento de gemas se aproximarem a 65% em relação ao total da matéria-prima (SILVA; SCHNEIDER, 2015), chama a atenção para um potencial incremento nos materiais da construção civil. Além disso, a incorporação de resíduos de pedras preciosas e/ou semipreciosas na mistura de concretos de cimento *Portland*, pode ser uma alternativa à utilização dos agregados convencionais, uma vez que os dois materiais apresentam características físicas, químicas e mineralógicas semelhantes.

1.5 Delimitações da pesquisa

- a) Para a mistura do concreto foram utilizados agregados locais, os quais foram disponibilizados pelo Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC);
- b) O cimento utilizado é do tipo CP IV ARI;
- c) O resíduo de beneficiamento utilizado é exclusivamente de ágata;
- d) Foram desenvolvidos 5 traços diferentes do padrão, com substituições do agregado miúdo por resíduo de beneficiamento de ágata em valores de 5, 7,5, 10, 12,5 e 15%;
- e) O resíduo de beneficiamento de ágata foi adquirido em uma empresa colaboradora do município de Teutônia/RS;
- f) As caracterizações químicas do resíduo de beneficiamento de ágata não foram realizadas novamente, uma vez que já existem dados de pesquisas anteriores com o mesmo resíduo proveniente da empresa colaboradora;
- g) Todas as caracterizações físicas dos materiais foram realizadas no LATEC seguindo as respectivas normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- h) Para os ensaios do concreto no estado endurecido de resistência à tração por compressão diametral, os corpos de prova foram testados aos 7 e 28 dias; e para resistência à compressão normal, o rompimento foi para 7, 28 e 56 dias;
- i) Nos ensaios de absorção por capilaridade, absorção por imersão e índice de vazios, os corpos de prova foram testados aos 28 dias; e para determinação da resistência ao desgaste por abrasão, os corpos de prova foram testados para a idade de 35 dias.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho se estrutura em 5 capítulos: introdução, revisão bibliográfica, programa experimental, resultados e conclusão. Por fim, ainda são apresentadas as referências utilizadas para compor o embasamento da pesquisa.

- a) Capítulo 1 – Introdução: contempla as considerações iniciais que expõem o assunto a ser desenvolvido por meio de pesquisa científica. São apresentados os objetivos, justificativas e delimitações ao tema;
- b) Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: são apresentados os conhecimentos teóricos necessários à compreensão do estudo;
- c) Capítulo 3 – Programa experimental: são apresentados os procedimentos experimentais, ensaios, para caracterização e atestado de qualidade, tanto das matérias-primas utilizadas no concreto, quanto do próprio concreto.
- d) Capítulo 4 – Resultados: contêm os resultados de caracterização química e física do resíduo de beneficiamento de ágata, identificação da capacidade pozolânica, e resultados para desempenho do concreto no estado fresco e endurecido.
- e) Capítulo 5 – Conclusões e considerações finais: apresenta o fechamento da pesquisa com considerações que relaciona os apontamentos identificados ao longo da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Potencial gemológico do Rio Grande do Sul

As pedras preciosas e semipreciosas sempre produziram encantamento sobre o homem. Devido à coloração variada, formas cristalinas ímpares, brilho e dureza característica, elas destacam-se por sua exuberância e potencial econômico. São formadas de maneira natural podendo apresentar origem orgânica (proveniente de animais e vegetais), ou inorgânica (a partir de rochas e minerais), cujos cristais se desenvolvem sob pressão dentro da crosta terrestre (SCHUMANN; FRANCO; DEL REY, 1994).

O Brasil se encontra entre as principais províncias gemológicas do mundo, devido à grande extensão de ocorrência de pedras somada à variedade de espécies. Segundo Juchem et al. (2009) praticamente todos os estados brasileiros extraem e beneficiam algum tipo de pedra. A Região Sul do País contribui para esta posição pelo fato de produzir e exportar significativos volumes de ágatas e ametistas, as quais são vistas tanto como para fins ornamentais, quanto para uso na fabricação de jóias.

A ágata e a ametista se desenvolvem a partir da cristalização de minerais dentro de geodos (locais de depósito de minerais com formas e dimensões variadas). Os geodos ocorrem em rochas de origem vulcânica compostas geralmente por quartzos e feldspatos, as quais, na Região Sul, estão presentes na Formação Serra Geral. Eventualmente, junto com essas gemas podem surgir distintos minerais, como cornalina, opala, zeólitas, gipsita, barita, entre outros (JUCHEM et al., 2009).

Na Figura 1 estão indicadas ilustrações de ametistas (quadro da esquerda) e ágatas

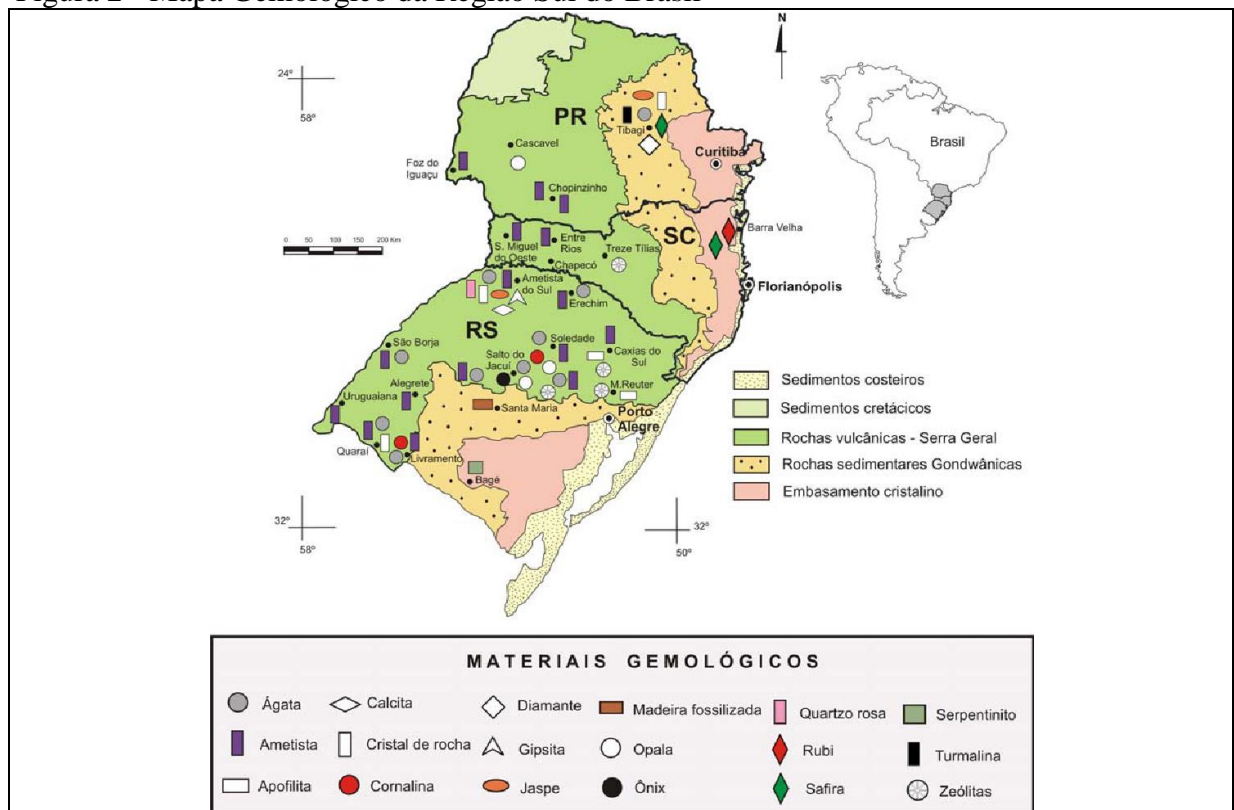
(quadro da direita). As Pedras apresentadas encontram-se tanto na sua estrutura natural quanto após tratamento específico; e, a diferença de padrões de cores sustenta-se pela presença de diferentes minerais associados à composição química dos geodos. E ainda, na Figura 2 pode-se localizar os diferentes depósitos gemológicos em que ocorrem a formação destas pedras na região, bem como o contexto geológico no qual estão inseridos.

Figura 1 - Ágatas e ametistas



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Juchem et al. (2009).

Figura 2 - Mapa Gemológico da Região Sul do Brasil



Fonte: Juchem et al.. (2009, p. 2).

Pode-se observar que, dentre os Estados da Região Sul, o Rio Grande do Sul (RS) se sobressai em depósitos minerais. De acordo com Souza (1996) o Estado assume a segunda colocação no *ranking* de maior produtor de pedras preciosas e semipreciosas do País, ficando

atrás apenas de Minas Gerais. Só no ano de 2010 eram cerca de 400 toneladas de pedras por mês (COSTA; JORNADA, 2013). Grande parte das jazidas de ágata encontra-se na Região de Salto do Jacuí, e as de ametistas localizam-se próximas à região de Ametista do Sul, onde se estima que existam cerca de 300 garimpos, entre ativos e inativos, sendo 80% da produção destinada ao mercado internacional (JUCHEM et al., 2009).

O Rio Grande do Sul também se destaca pela geração de emprego em torno da extração de pedras. O Estado “figura como o terceiro maior empregador do Brasil (9,9%), atrás de São Paulo (48,3%) e de Minas Gerais (11,8%)” (COSTA; JORNADA, 2013, p. 43). Tais dados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição dos empregados formais no Brasil em torno das atividades industriais do setor de gemas no ano de 2010

Estado	Extração de gemas e metalurgia de metais preciosos	Fabricação de produtos minerais	Lapidação de gemas, fabricação de artefatos e bijuterias	Fabricação de bijuterias	Divisão por Estados (%)
São Paulo	802	12659	5982	3397	48,3
Minas Gerais	520	2903	1318	820	11,8
Rio Grande do Sul	117	1175	3071	308	9,9
Rio de Janeiro	126	1962	588	1148	8,1
Paraná	6	1414	643	44	4,5
Espírito Sato	70	1554	30	16	3,5
Santa Catarina	2	940	63	145	2,4
Paraíba	18	965	2	0	2,1
Ceará	8	400	344	124	1,9
Outros Estados	1789	26060	12741	6701	7,6

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Costa e Jornada (2013).

No ano de 2010, as atividades ligadas à extração e beneficiamento no Rio Grande do Sul representavam cerca de 0,65% do total de empregos. O setor distribui-se praticamente em todas as regiões do Estado, como Alto Jacuí, Fronteira Oeste, Alto da Serra do Botucaraí, Vale do Taquari e Serra (COSTA; JORNADA, 2013).

No Vale do Taquari, em especial, no ano de 2003 havia 45 empresas, com atividades distribuídas tanto na indústria do beneficiamento, quanto comércio e serviços. Um estudo realizado por Costa (2007) a partir de informações do Banco de Dados Regional da UNIVATES, revelou que a indústria de pedras preciosas gerava 337 funcionários diretos e 124 indiretos. Além disso, o Vale do Taquari é visto como pólo de industrialização e exportação. De acordo com Silva e Schneider (2015) aproximadamente 95% da produção de ametista e ágata é exportada para os Estados Unidos, Alemanha e Inglaterra. Dados que afirmam a forte identidade do setor na localidade desde 1960.

2.1.1 A indústria do beneficiamento de gemas no Vale do Taquari

O Rio Grande do Sul possui pontos de extração de pedras preciosas distintos: a região norte, Alto Uruguai e Fronteira Sudeste contam com a presença de ametista; e, na região do Salto do Jacuí tem-se a presença de ágatas. Esses locais apresentam depósitos significativos, porém não mais importantes para a economia do que garimpos locais de ágatas em algumas cidades do Vale do Taquari, como Nova Bréscia e Lajeado (SOUZA; SAMPAIO, 1994 apud COSTENARO, 2005). Nessas localidades, os imigrantes alemães, além de encontrarem pequenas jazidas, também trouxeram técnicas para extração e beneficiamento. Lajeado e Estrela foram as primeiras cidades do RS a desenvolverem pequenas fábricas para esse fim com foco no mercado externo.

Até o início da década de 1970, Lajeado monopolizava toda a industrialização de pedras preciosas, mas, já no final desta década, pela proximidade com as regiões produtoras e, possivelmente, pela disponibilidade de mão de obra mais barata, houve o deslocamento das empresas industriais de processamento de Lajeado para Soledade (COSTENARO, 2005, p. 52).

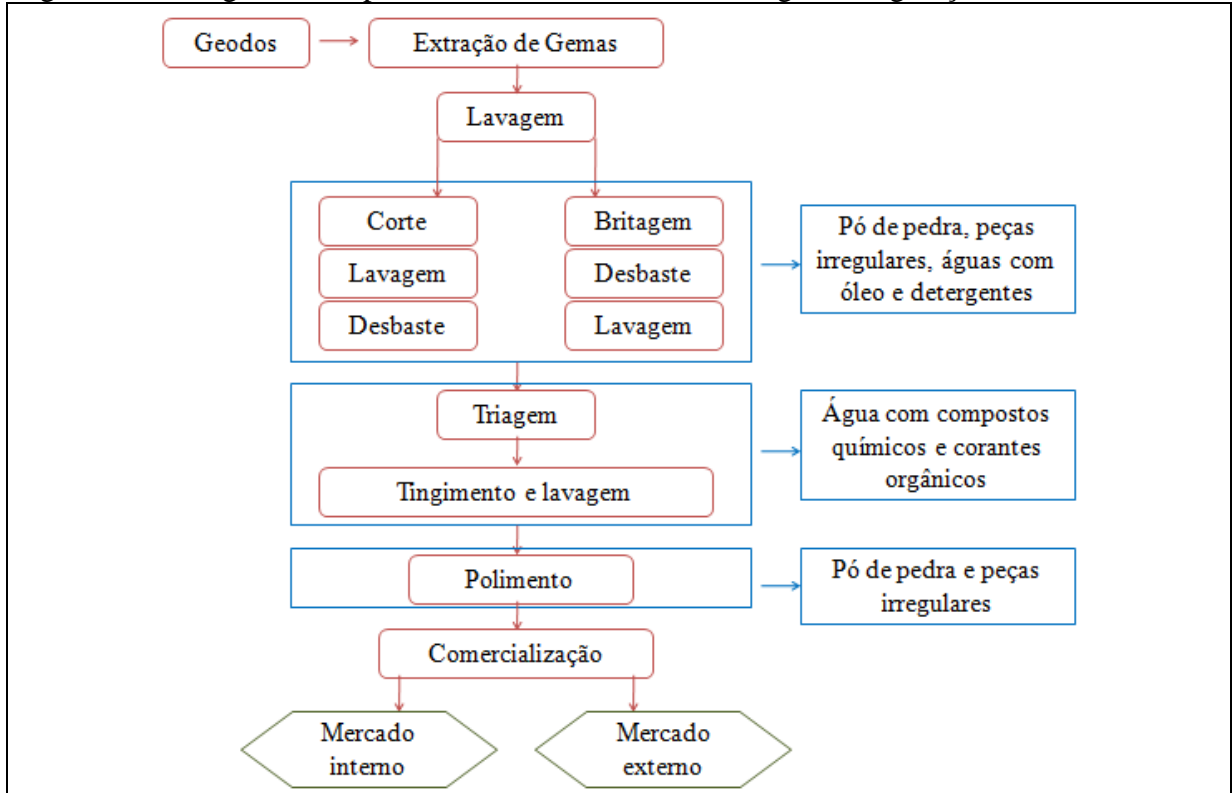
Os processos desenvolvidos antigamente e existentes até os dias de hoje são realizados por micro e pequenas empresas. No geral, elas contam com baixo número de funcionários e poucos recursos, revelando uma identidade familiar, cuja gestão do empreendimento assume certas dificuldades (COSTA, 2007).

As características do setor industrial de extração e beneficiamento de pedras reveladas pelo Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM 2003, 2005) e apresentadas por Costa (2007), afirmam a existência de baixos avanços tecnológicos na produção. Os profissionais, com baixa capacitação e pouco conhecimento em gemologia, desenvolvem procedimentos primários de corte e lapidação dos geodos, martelação das pedras e artesanato mineral. Muitas empresas, na inexistência de maquinários específicos, desenvolvem seus próprios meios para extrair e beneficiar, geralmente de maneira artesanal e com muitos desperdícios. Não obstante, os locais de extração, apresentam baixas condições de trabalho e tecnologias ultrapassadas. O somatório de todos esses fatores, segundo Batisti e Tatsch (2012, p. 521), resulta em “condições de trabalho inadequadas nos garimpos, utilização de tecnologias obsoletas, baixa produtividade, e produtos minerais ainda de pouco valor agregado (representado pelos minerais em estado bruto)”.

O processo de beneficiamento de pedras é formado basicamente pelas etapas de corte, lixamento, polimento e acabamentos finais conforme fluxograma da Figura 3. Os principais

resíduos gerados na cadeia produtiva são os cacos de pedra, pó de pedra e o lodo proveniente das diferentes etapas do processo (SINDELAR; BARDEN; STÜLP, 2013).

Figura 3 - Fluxograma dos processos de beneficiamento de gemas e geração de resíduos



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Silva e Schneider (2015).

Conforme o fluxograma de produção, após a extração dos geodos, as gemas naturais (pedras brutas) podem seguir duas linhas de conformação: corte ou britagem. Ambos os processos objetivam fragmentar os geodos e dar forma às pedras menores, e para melhor desempenho, os equipamentos mecânicos contam com o auxílio de óleos e graxas. Portanto após esta etapa as peças menores são lavadas em uma solução especial com detergentes, e partem para uma triagem (SILVA; SCHNEIDER, 2015). No trabalho de Sindelar, Barden e Stülp (2013) foi constatado que apenas 65% das peças seguem para um tratamento final, enquanto 35% são descartadas por algum tipo de defeito. Já nos processos seguintes de acabamento, como tingimento e polimento, apenas 15% de toda a matéria-prima inicial apresenta qualidades que permitem a comercialização, sendo o restante transformado em resíduo.

2.1.2 Resíduo de beneficiamento de ágata

“A industrialização das gemas produz como resíduos a lama de corte, íons metálicos, corantes orgânicos em solução e águas de lavagem dos diferentes processos que compreendem o desbaste, polimento, tingimento e lapidação” (SILVA; SCHNEIDER, 2015, p. 12). Na visão de Costa e Jornada (2013) os resíduos englobam o pó de pedra proveniente do lixamento e polimento; efluentes líquidos com óleos, graxas e detergentes provenientes dos processos de corte, britagem e lavagem; compostos orgânicos associados à etapa de tingimento; graxas provenientes do corte; resíduos de cola, plástico, parafina e outros materiais utilizados para compor o produto final.

Dentre os descritos acima, o resíduo mais comum é uma espécie de lodo, o qual é uma associação de pó de pedra com os óleos e detergentes. Este lodo, também chamado de lama, apresenta geralmente, cor acinzentada decorrente dos óleos, fragmentos e pó de pedras, conforme ilustra a Figura 4. Devido à falta de controle de qualidade na produção, e ainda em consequência dos procedimentos não tecnológicos, mais de 50% da matéria-prima se transforma em resíduos, segundo Sindelar, Barden e Stülp (2013).

Figura 4 - Resíduo de beneficiamento de ágata



Fonte: Sindelar, Barden e Stulp (2013, p. 5).

O óleo presente na mistura é do tipo diesel utilizado na lubrificação das máquinas de corte, geralmente serras caixão (FIGURA 5) adaptadas para o setor de beneficiamento (BEDIN, 2014). Com a finalidade de recuperar o óleo da mistura do lodo e redirecioná-lo novamente à produção, muitas indústrias realizam o processamento do lodo em mistura aquosa para separação dos óleos. De maneira simples, sem padrões técnicos, o lodo é misturado à água e agitado. A resultante é uma mistura heterogênea com três fases, onde os sólidos e os óleos ficam separados pela água a qual é condicionada como solvente neste processo (SILVA; SCHNEIDER, 2015). A parte sólida restante é deposita em tonéis, os quais

são destinados a aterros ou, em sua maioria, ficam armazenados no pátio da empresa como indica a Figura 6.

Figura 5 - Serra caixão



Fonte: Da Autora, (2018).

Nota: a serra caixão é utilizada para dar início ao processo de beneficiamento através do corte de geodos brutos. O nome caixão é referente ao fechamento com tampo de aço superior para impedir a projeção de peças e o contato humano durante a ativação da serra. O óleo é constantemente incorporado para lubrificação da serra devido a sua alta velocidade de rotação.

Figura 6 - Resíduos depositados no pátio da empresa



Fonte: Da Autora, (2018).

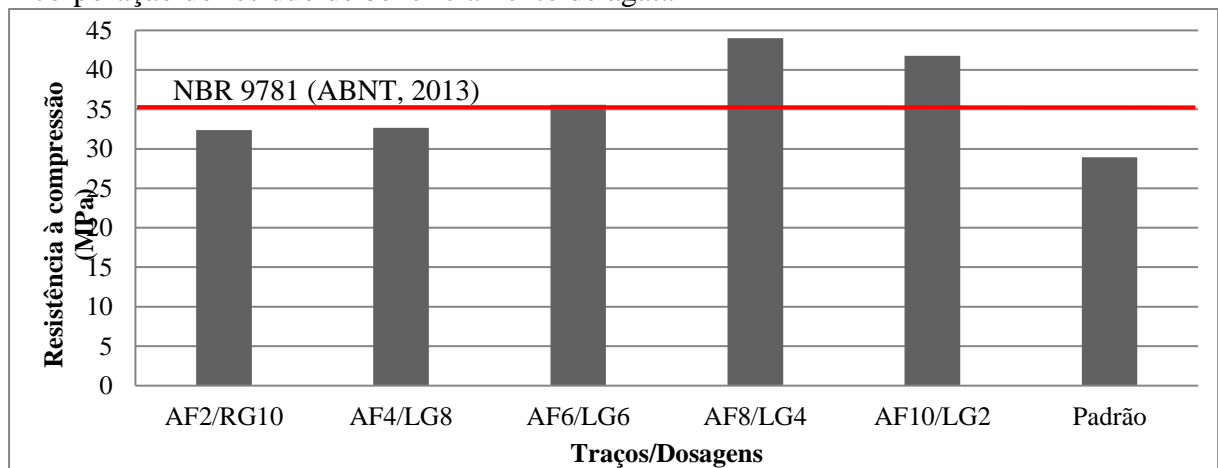
2.1.3 A construção civil como alternativa para o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas e semipreciosas

A reutilização de resíduos dentro da construção civil é cada vez mais comentada como forma de se atingir uma produção e desenvolvimento sustentável. A indústria cimentícia é um dos setores da construção civil que mais utiliza resíduos próprios e de outras empresas. A cinza volante e escória de alto forno, por exemplo, são resíduos empregados na produção de cimentos que apresentam tamanha importância a ponto de se destacarem na Classe II dos

cimentos normatizados pela ABNT (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

O concreto também é um material que aceita ser misturado aos mesmos resíduos empregados em cimentos e até mesmo a outros materiais não convencionais (PEREIRA et al. 2015). Giovanella (2017) produziu pisos de concreto intertravados vibro-prensados (*pavers*) com a incorporação de resíduo de beneficiamento de ágata em substituições a areia fina (as frações de areia média e grossa não foram alteradas). O estudo indicou melhorias nas características do produto em relação a um referencial, tanto em relação à resistência quanto à redução da absorção de água. O Gráfico 1 exemplifica apenas os resultados de resistência à compressão dos *pavers* obtidos por Giovanella (2017), sendo que as melhores resistências foram alcançadas para as menores porcentagens de resíduo de beneficiamento de ágata: AF8/LG4 (8% de areia fina e 4% de resíduo de beneficiamento de ágata) e o AF10/LG2 (10% de areia fina e 2% de resíduo de beneficiamento de ágata). O autor indica ainda que o resíduo de beneficiamento de ágata possa ter atuado como um material de preenchimento dos poros do concreto, semelhante ao *fíler*, mesmo que essa capacidade não tenha sido investigada durante a pesquisa.

Gráfico 1 - Valores de resistência à compressão encontrados para *pavers* produzidos com a incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata



Fonte: Adaptado pela autora com base em Giovanella (2017).

Nota: AF8/LG4: 8% de areia fina e 4% de resíduo de beneficiamento de ágata; AF10/LG2: 10% de areia fina e 2% de resíduo de beneficiamento de ágata; AF0/LG12: 12% de areia fina e 0% de resíduo de beneficiamento de ágata; AF6/LG6: 6% de areia fina e 6% de resíduo de beneficiamento de ágata; AF4/LG8: 4% de areia fina e 8% de resíduo de beneficiamento de ágata; Padrão: traço padrão da empresa colaboradora. A linha em destaque no eixo das ordenadas indica o valor mínimo de resistência para a produção de *pavers* de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013): Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio.

O resíduo de beneficiamento de ágata também já foi testado quanto à viabilidade de incorporação na massa cerâmica vermelha para a produção de tijolos maciços. Bruxel (2012) testou corpos de prova com 0, 5, 9, 13 e 17% de resíduo em substituição parcial à argila

vermelha. Os corpos de prova foram submetidos ao mesmo processo de queima realizado na produção de tijolos, porém, as melhorias nas características físicas foram identificadas apenas para valores até 5% de incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata, conforme indicado pela Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos corpos de prova após a queima com a incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata

Substituição de argila vermelha por resíduo de beneficiamento de ágata (%)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)	Massa específica (g/cm ³)
0	11,44 ± 1,70	19,28 ± 0,57	1,94 ± 0,15
5	7,90 ± 1,29	21,26 ± 0,59	1,84 ± 0,03
9	6,39 ± 1,13	22,77 ± 0,74	1,83 ± 0,0
13	4,68 ± 0,90	24,25 ± 1,03	1,82 ± 0,01
17	3,57 ± 0,52	24,96 ± 1,22	1,81 ± 0,01

Fonte: Bruxel (2012, p. 214).

2.2 Concreto

O concreto é um produto resultante da mistura de materiais inertes (agregados) em um meio aglomerante. Quando em estado fresco, deve ser trabalhável o suficiente para que possa ser manuseado sem perder a coesão entre partículas. E, em estado endurecido, deve ter durabilidade e resistência adequadas, de maneira que possa ser utilizado nas estruturas das edificações (AMBROZEWICZ, 2012).

O meio aglomerante é resultado de uma pasta composta pela mistura de água e Cimento *Portland* (CP). Para Petrucci (1998) a principal função da pasta é envolver os agregados e preencher os vazios do concreto, conferindo impermeabilidade ao conjunto. Geralmente, os agregados utilizados na mistura são combinados em grãos e miúdos com o intuito de diminuir a porosidade, favorecer a durabilidade e conferir volume à massa de concreto a fim de contribuir com a resistência.

2.2.1 Cimento *Portland*

O cimento é considerado o aglomerante hidráulico mais importante dentro da produção do concreto (AMBROZEWICZ, 2012). É oriundo do processo de moagem do *clínquer*, o qual é formado por pedras calcárias e argilas, sendo basicamente composto por silicatos e aluminatos de cálcio. Inicialmente esses componentes são britados e misturados,

para então, serem calcinados até a temperatura de fusão, e posteriormente moídos juntamente com gesso. A resultante desse processo, é um pó fino que em contato com a água, desencadeia o processo de hidratação que resulta no endurecimento da mistura (PETRUCCI, 1998).

Porém, apenas o cimento em seu estado puro (*clínquer* e gesso), não atende à demanda da indústria do concreto. Dadas as necessidades estruturais particulares a cada situação, foram desenvolvidos cimentos diferenciados alterando a composição do *clínquer* ou, simplesmente acrescentando adições minerais ao CP (METHA; MONTEIRO, 2008). Segundo Pedroso (2009), atualmente no Brasil existem 8 classes especiais de cimentos cada qual com referências e padrões limitados pela ABNT, conforme indicado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classes de Cimento Portland disponíveis no Brasil

ABNT	SIGLA	CLASSE	DENOMINAÇÃO
NBR 5732	CP I	25, 32, 40	Portland comum
	CP I-S	25, 32, 40	Portland comum com adição de filer carbonático
			Portland comum com adição de escória ou pozolana
NBR 11578	CP II-E	25, 32, 40	Portland composto com escória
	CP II-Z	25, 32, 40	Portland composto com pozolana
	CP II-F	25, 32, 40	Portland composto com filer
NBR 5735	CP III	25, 32, 40	Portland de alto-forno
NBR 5736	CP IV	25, 32	Portland pozolânico
NBR 5733	CP V-ARI	-	Portland de alta resistência inicial

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Metha e Monteiro (2008) e Ambrozewicz (2012).

2.2.3 Agregados

Bauer (2008) expõe os agregados como sendo materiais particulados, não coesivos, com pouca ou nenhuma atividade química, e existentes em variadas granulometrias e composições. São utilizados para enchimento da massa conferindo maior peso e volume, o que auxilia na resistência do conjunto; atuam como materiais de preenchimento reduzindo os espaços vazios e consequentemente diminuindo a porosidade e permeabilidade; além disso, também podem influenciar na durabilidade e desempenho do concreto. Diante disto Bauer (2008, p. 104) afirma que “os agregados constituem um componente importante no concreto, contribuindo cerca de 80% do peso e 20% do custo do concreto estrutural sem aditivos”.

Para Neville e Brooks (2013) o conhecimento das características físicas dos agregados é determinante para a produção de misturas cimentícias com resultados satisfatórios. Sendo assim, um dos ensaios mais importantes é a análise granulométrica. Nesse contexto, Ambrozewicz (2012, p. 40) afirma que “a granulometria de um agregado tem grande

influência sobre a qualidade dos concretos e argamassas, tanto no estado plástico (trabalhabilidade), como após endurecido (compacidade e resistência)”.

A determinação granulométrica é obtida pelo peneiramento dos agregados, conforme diretrizes da NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). O ensaio possibilita a identificação da variação do tamanho de grão em dada quantidade de amostra de material, e também as porcentagens que cada faixa granulométrica representa no montante analisado (NETO, 2011).

2.2.3.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo é um material particulado “cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248, com peneiras definidas pela NBR NM ISO 3310” (ABNT NBR 7211, 2009, p. 3). Em complemento, para Petrucci (1998), os agregados miúdos são as areias naturais com base quartzosa ou pedriscos britados, cujas partículas ficam retidas na peneira de 4,75 mm em um valor máximo de 15%.

A areia é o agregado miúdo natural mais utilizado na produção de concretos. Apresenta composição quartzosa em combinação com outros minerais de menor relevância. Segundo a NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação (ABNT, 2009), a areia é dividida em 4 faixas granulométricas: muito fina, fina, média e grossa. De acordo com Ambrozewicz (2012), estas mesmas faixas são aplicadas para a divisão do Módulo de Finura (MF) da areia conforme indicado na Tabela 3.

O módulo de finura (MF) é adquirido pelo somatório das massas de agregado retidas acumuladas nas peneiras da série normal, divididas por 100 (ABNT NBR 7211, 2009).

Tabela 3 - Limites de módulo de finura

Denominação	Faixa	Módulo de finura (MF)
Muito fina	Faixa 1	de 1,35 a 2,25
Fina	Faixa 2	de 1,71 a 2,85
Média	Faixa 3	de 2,11 a 3,38
Grossa	Faixa 4	de 2,71 a 4,02

Fonte: Ambrozewicz (2012, p. 51).

A NBR 7211 (ABNT, 2009) também especifica limites de porcentagens de distribuição granulométrica referentes à zona utilizável e à zona ótima para concretos

convencionais (TABELA 4). A existência dessas limitações se sustenta pela influência na trabalhabilidade e nos custos de produção do concreto. Haja vista que, areias grossas produzem concretos ásperos, enquanto que areias finas, por demandarem mais água de amassamento, podem vir a causar a exsudação do concreto (NETO, 2011).

Tabela 4 - Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
0,6 mm	15	35	55	70
0,3 mm	50	65	85	95
0,15 mm	85	90	95	100

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009, p. 5).

2.2.3.1.1 Massa específica e massa unitária

Petrucci (1998, p. 48) define a massa específica como sendo “a massa de unidade de volume excluindo deste os vazios permeáveis e os vazios entre grãos”. Enquanto que a massa unitária, também conhecida como massa específica aparente, é a massa de unidade de volume incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. Esses valores podem ser encontrados respectivamente pelas normas da NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009), e NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2006).

Por meio da massa unitária torna-se viável a conversão de traços de concreto em massa para volume e vice-versa (AMBROZEWICZ, 2012). Já a massa específica, segundo Bauer (2008), é utilizada para cálculos quantitativos de agregados e cimento.

2.2.3.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo é um material particulado “cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248, com peneiras definidas pela NBR NM

ISO 3310-1.” (ABNT NBR 7211, 2009, p. 7). Ainda, de acordo com Petrucci (1998), são agregados graúdos geralmente pedregulhos, pedras britadas e seixos rolados, cujas partículas passam no máximo 15% na peneira de malha 4,75 mm.

Os agregados graúdos se originam de maneira natural, porém, muitas vezes, são submetidos a processos industriais, como britagem e trituração, para conformá-los de acordo com as exigências de mercado (PETRUCCI, 1998). A exemplo disso tem-se a pedra britada como “o agregado industrializado mais utilizado na construção civil, sendo obtido de rochas extraídas em jazidas na natureza e, depois, trituradas e separadas em dimensões padronizadas” (AMBROZEWICZ, 2012, p. 45).

As pedras britadas se dividem em 5 grupos conforme Tabela 5. Bauer (2008) afirma que para amassamento de concreto é comum a utilização de britas de número 1 ou 2, ou a combinação de ambas, em concretos. O pó de brita também é muito utilizado na produção de concretos convencionais, pois reduz os vazios permeáveis (porosidade). Todavia, este material apresenta diâmetro de grão inferior à brita 0, logo, por se tratar de um subproduto da britagem de rochas, não se enquadra na classificação de agregados graúdos ou miúdos.

Tabela 5 - Limites granulométricos para classificação da pedra britada

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada Zona granulométrica (mm)				
	4,75/12,5 Brita 0	9,5/25 Brita 1	19/31,5 Brita 2	25/50 Brita 3	37,5/75 Brita 4
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25	87 – 100	-
19 mm	-	2 - 15	65 - 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40- 65	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15	80 - 100	-	-	-
6,3 mm	40 - 65	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 - 100	95 -100	-	-	-

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7211 apud Neto (2011, p. 244).

Os conceitos de massa específica e massa unitária para agregados graúdos são os mesmos discutidos anteriormente para agregados miúdos. Entretanto, a normativa para realização do ensaio de massa específica é a NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica (ABNT, 2009), enquanto que para definição da massa específica unitária o ensaio mantém o padrão da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

2.2.4 Adições

Adições minerais são produtos inorgânicos de granulometria fina, adicionados a massa do concreto com o intuito de reduzir a quantidade de cimento e água e produzir melhorias nos efeitos físicos e químicos (ALBUQUERQUE; LIMA, 2014). Nesse contexto, podem chegar a 70% do volume de cimento para compor a massa de concreto, sendo que as adições comumente utilizadas são as pozolanas e a sílica ativa. Ainda, segundo Metha e Monteiro (2008), atualmente alguns subprodutos e resíduos industriais também estão sendo utilizados, como é o caso da cinza de casca de arroz e da escória de alto forno.

Dal Molin (2011) sugere uma divisão entre as adições: materiais pozolânicos, tais como vidros vulcânicos; e, materiais cimentantes, como a escória de alto forno, os quais possuem capacidades químicas semelhantes às do cimento. O material *fíler* também é tido como uma adição, porém, devido a sua granulometria fina e falta de atividade química, apresenta apenas capacidade de preenchimento de vazios e redução da porosidade.

2.2.4.1 Materiais Pozolânicos

Os materiais pozolânicos não possuem propriedades cimentícias (aglomerantes), mas formam compostos de hidratação em combinação com o hidróxido de cálcio quando finamente moídos e em presença de água (DAL MOLIN, 2011). Segundo NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014), as pozolanas podem ser divididas em dois grupos conforme a origem: naturais, quando provenientes de materiais de origem vulcânica; e, artificiais, quando originárias de processos industriais de caráter pozolânico. E ainda, quanto ao tipo de pozolanas, se dividem em três classes de acordo com a composição química e física:

- a) Classe N, pozolanas naturais ou artificiais;
- b) Classe C, matérias como cinza volante, proveniente da queima de carvão mineral;
- c) Classe E, qualquer material que não se encaixe nas classificações anteriores.

Os requisitos mínimos para aceitação de um material com caráter pozolânico são definidos pelas informações presentes Tabela 6.

Tabela 6 - Requisitos para caracterizar um material pozolânico

Requisitos químicos (%)			
Propriedades	Classe N	Classe C	Classe E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Requisitos físicos (%)			
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μm	< 20	< 20	< 20
Índice de atividade pozolânico com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90	≥ 90	≥ 90

Fonte: Adaptado pelo autor com base na da NBR 12653 (ABNT, 2014, p. 3 – 4).

2.2.5 Aditivos

De acordo com a NBR 11768, aditivos para concreto de cimento Portland são definidos como produtos que, adicionados em pequena quantidade às misturas, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições. As substâncias químicas ativas dos aditivos [...] podem interagir física, química e físico-quimicamente com as partículas de cimento (QUARCIONI; DE CASTRO, 2013, p. 44).

Segundo Benini et al. (2011), os aditivos são utilizados tanto para homogeneizar a mistura quanto para conferir características distintas ao concreto endurecido. Existem aditivos diferentes para cada situação, por exemplo, os plastificantes e incorporadores de ar melhoram a trabalhabilidade do concreto ao mesmo tempo em que diminuem a relação água/cimento. Contudo, o fator comum a todos eles é a quantidade adicionada à massa de mistura, que pode variar entre 0,05% e 5% sobre o total da massa de materiais cimentícios.

2.2.6 Água

Ambrozewicz (2012, p. 102) define a água como “um dos componentes mais importantes na confecção de concretos e argamassa. [...] que influencia diretamente na qualidade e segurança da obra”. Sendo assim, segundo Neville e Brooks (2013), para que a água não prejudique os processos de hidratação do cimento e interfira na qualidade do produto final, ela deve atender a padrões mínimos de qualidade descritos pela NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto (ABNT, 2009).

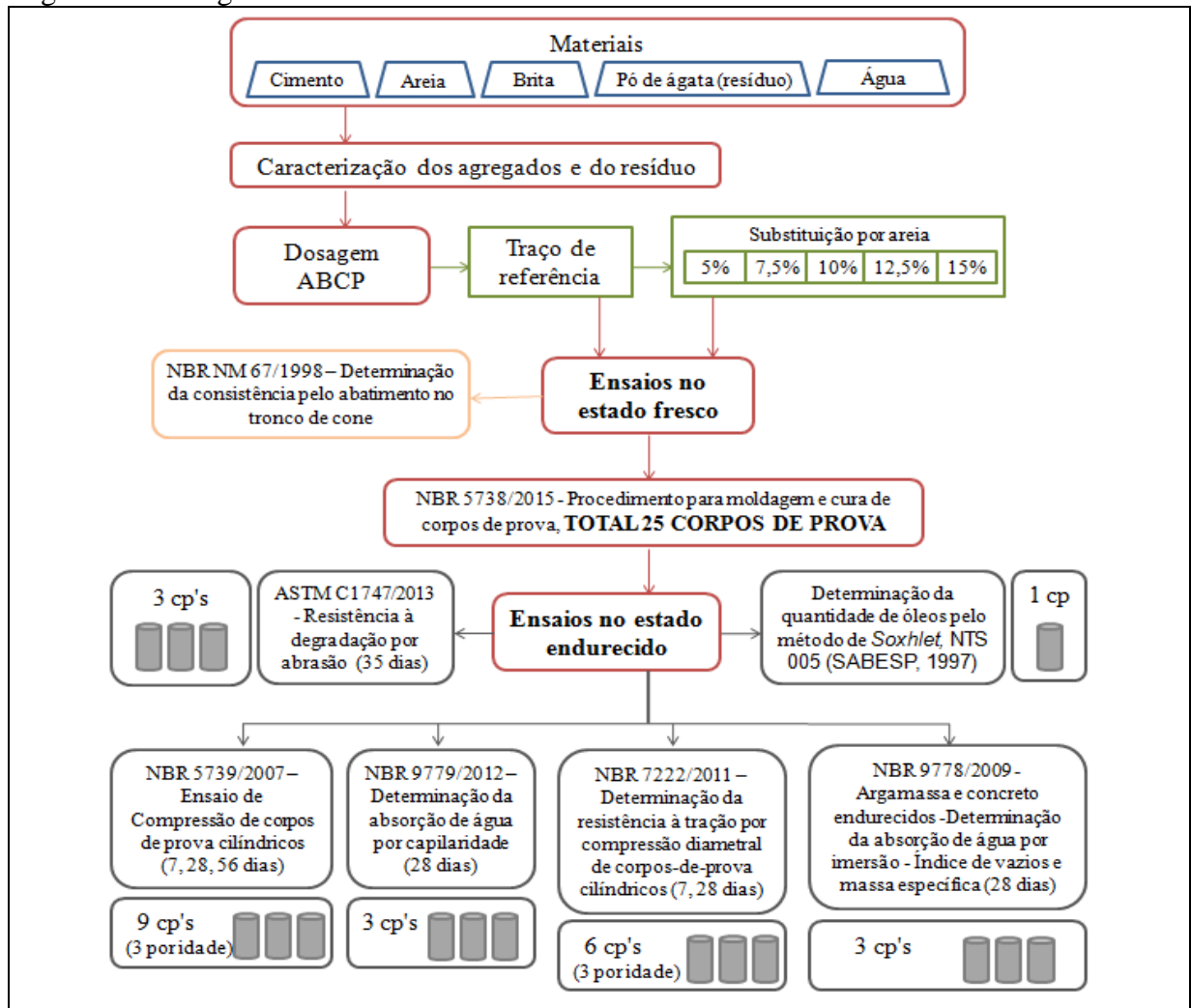
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de cumprir com os objetivos da pesquisa foram executados ensaios de caracterização para conhecimento do resíduo de beneficiamento de ágata e dos agregados constituintes do concreto. Também foram realizados ensaios para reconhecimento do desempenho do concreto quanto as suas características físicas, em relação ao estado fresco e endurecido. O fluxograma apresentado na Figura 7 tem como função esclarecer, de maneira simplificada, as etapas realizadas durante este trabalho.

Os procedimentos de caracterização física dos agregados foram executados no LATEC da UNIVATES, localizado em Lajeado (RS), em conformidade com as respectivas normas disponibilizadas pela ABNT. Os materiais e aparelhos utilizados no estudo também seguiram normas de referência para aplicação nos ensaios de caracterização e desempenho.

O resíduo de beneficiamento de ágata foi fornecido por uma empresa beneficiadora da cidade de Teutônia (RS). Os ensaios de caracterização física para este material também foram realizados no LATEC. E ainda, como o resíduo de beneficiamento de ágata já influenciou outras pesquisas no programa de pós-graduação e Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento da UNIVATES, os ensaios acerca das características químicas do material já foram orientados sob supervisão da Prof. Dra. Eniz Conceição Oliveira em conjunto com um grupo de pesquisa acadêmica, sendo que os resultados foram disponibilizados para auxiliar esta pesquisa. Os referidos ensaios de caracterização química e mineralogia do resíduo de beneficiamento de ágata foram executados no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), localizado no município de Criciúma, no Estado de Santa Catarina.

Figura 7 - Fluxograma de ensaios



Fonte: Da Autora (2018).

3.1 Cimento

O cimento utilizado para a dosagem do concreto foi do tipo CP V – ARI de Alta Resistência Inicial da marca Cimpor, fabricado pela indústria *InterCement* Brasil. A alta resistência inicial se dá pela finura elevada e uma maior quantidade de silicato tricálcico (C₃S), que proporcionam maior rapidez nos processos de hidratação do cimento e crescimento acelerado da resistência logo nos primeiros dias.

Conforme o fabricante este cimento atende as normas da NBR 5733: Cimento *Portland* de alta resistência inicial (ABNT, 1991) e NBR 5737: Cimento *Portland* resistente a sulfatos (ABNT, 1992), além disso, também contém na composição adição de até 5% de *fíler* calcário e apresenta massa específica de aproximadamente 3,15 g/cm³. O CP V – ARI é ideal

para uso em estruturas que demandam altas resistências iniciais e desformas rápidas. É utilizado tanto em pequenas construções, quanto para a produção de artefatos industriais como peças pré-fabricadas e protendidas, podendo alcançar em 24 horas uma resistência de 21 MPa.

3.2 Água de amassamento

A água utilizada para amassamento do concreto foi proveniente da CORSAN e foi disponibilizada pelo LATEC. Visualmente e fisicamente a água não contém impurezas que possam vir a prejudicar as reações químicas do concreto. Assim, pode-se dizer que ela atende aos requisitos mínimos de qualidade apresentados pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

3.3 Agregado Miúdo

A areia utilizada é de origem natural quartzosa disponível pelo LATEC. Para conhecimento físico foram realizados ensaios prévios de caracterização.

3.3.1 Determinação Granulométrica

O ensaio para determinar a faixa granulométrica da areia foi executado conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003) com uma amostra de cerca de 500 g do material previamente seco em estufa entre 105 ± 5 °C. Foram utilizadas peneiras da marca Solotest, compostas por tela inox, de série normal conforme padrões da NBR NM-ISO 3310 -1 (ABNT, 2010), de malha 4,75, 2,36, 1,18, 0,6, 0,3 e 0,15 mm. O ensaio foi realizado para duas amostras de agregado.

A amostra de areia foi despejada em um conjunto de peneiras conforme Figura 8, o qual, para melhor separação das frações granulométricas, foi levado ao agitador de peneiras da marca Solotest com controle de vibração e capacidade para 8 peneiras, por 5 minutos.

Figura 8 – Peneiramento do agregado miúdo



Fonte: Da Autora (2018).

Cada fração de areia retida nas peneiras foi pesada em uma balança da Marte Científica e Instrumentação Industrial Ltda., modelo AD16K, com precisão de 0,1 g e capacidade para 16,2 kg. Os valores obtidos para a distribuição granulométrica das duas amostras de areia estão indicados na Tabela 7. Com base no valor do MF, pode-se identificar que se trata de uma areia média (classificação conforme NBR 7211 (ABNT, 2009) apresentada na Tabela 3 do item 2.2.3.1).

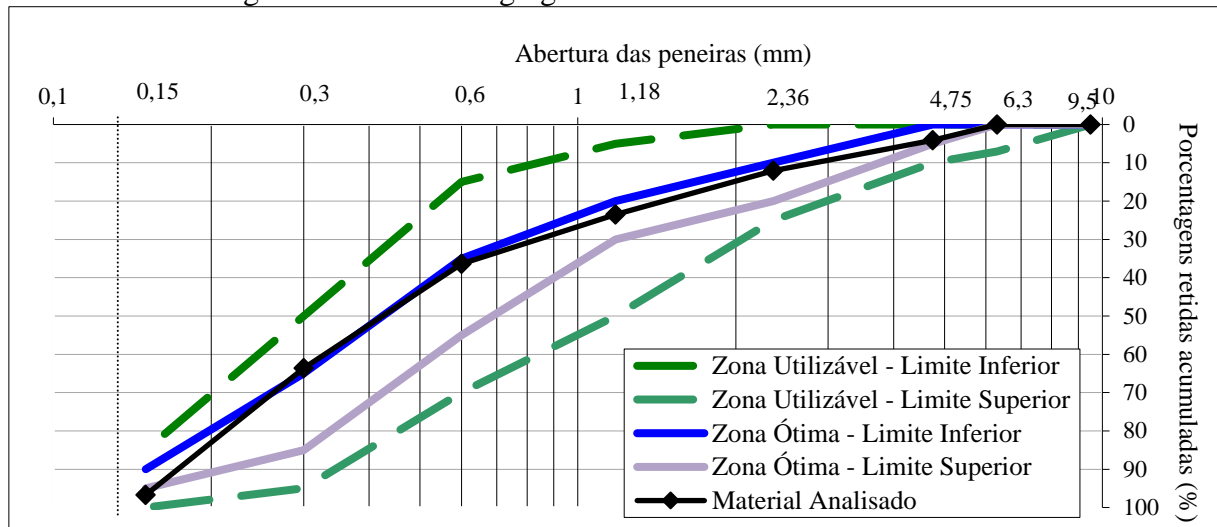
Tabela 7 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Malha (mm)	Massa (gr)		Retida (%)		Retida Variações (%)	Retida Média (%)	Retida acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
9,5	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,3	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	18,9	23,4	3,70	4,60	0,90	4,10	4,10
2,36	41,2	40,7	8,00	7,90	0,00	8,00	12,1
1,18	61,2	56,9	11,8	11,1	0,70	11,5	23,5
0,6	68,9	63,9	13,3	12,5	0,80	12,9	36,4
0,3	141,4	139,2	27,3	27,2	0,10	27,2	63,7
0,15	169,7	170,8	32,8	33,3	0,60	33,1	96,7
Fundo	16,4	17,4	3,2	3,4	0,20	3,3	100,0
Total	517,7	512,3	Módulo de finura = 2,36			DMC = 4,75	

Fonte: Da Autora (2018).

A distribuição granulométrica também está ilustrada pelo Gráfico 2, o qual relaciona a areia analisada com os limites de utilização também impostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Observa-se que a areia utilizada para o estudo encontra-se dentro da zona ótima de utilização.

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Da Autora (2018).

3.3.2 Determinação da massa específica e massa unitária

A massa específica foi executada com base na NBR NM 52 (ABNT, 2009). O ensaio consiste na relação entre o agregado seco em estufa e a quantidade de água que ocupa um volume igual ao total de sólidos do agregado, excluindo os poros permeáveis.

Uma amostra de 1 kg de areia foi deixada em repouso em um recipiente com água por 24 horas. Após este período a areia foi disposta em uma superfície plana para evaporação natural da água até a condição de saturação com superfície seca (verificação através do preenchimento de um molde cônico até o desmoronamento da amostra, FIGURA 9).

Figura 9 - Areia em condição de saturação com superfície seca

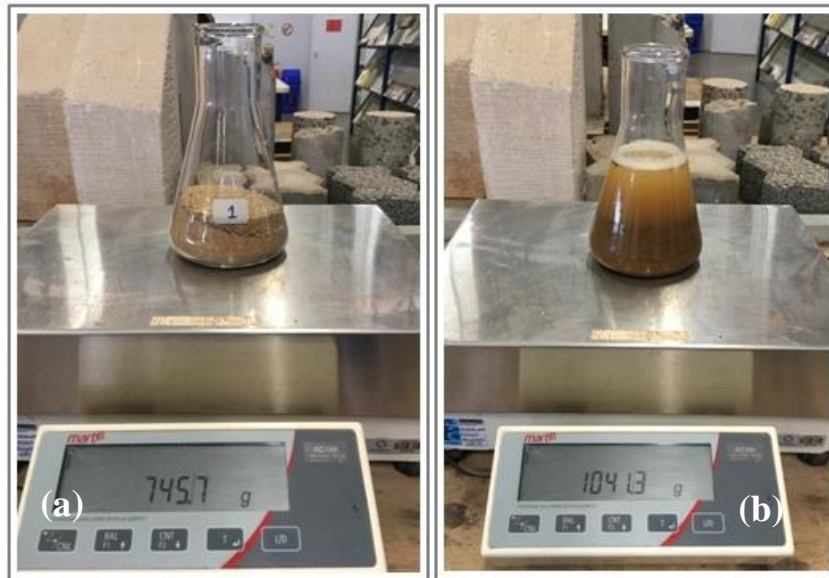


Fonte: Da Autora (2018).

Nota: O quadro (a) representa o agregado miúdo ainda com umidade superficial, ou seja, quando compactado com 25 golpes dentro de um molde cilíndrico, este consegue manter a forma cônica. A partir desta situação o agregado miúdo seguiu a secagem natural até não conseguir mais manter a forma do molde, como representa o quadro (b).

A partir da amostra saturada com superfície seca, uma quantia de 500 g (ms) foi adicionada a um frasco com capacidade de 500 cm³ de massa conhecida, sendo registrada a massa total do conjunto (m1). Em seguida, adicionou-se água até a faixa de 500 cm³, cuja massa total também foi registrada (m2). Ambas as situações estão indicadas na Figura 10.

Figura 10 - Procedimento para determinação da massa específica da areia



Fonte: Da Autora (2018).

O agregado miúdo foi retirado do frasco e seco até a massa constante, em uma estufa entre 105 ± 5 °C, após atingir a temperatura ambiente, sua massa foi registrada (m). Deste modo, o cálculo para determinação da massa específica é dado pela Equação 1, o qual resultou no valor de 2,47 g/cm³.

$$\gamma = \frac{m}{\left(V - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \right) \right) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (1)$$

Onde:

γ : massa específica (g/cm³);

V: volume total do frasco (500 cm³);

m1: massa do conjunto frasco + agregado miúdo (g);

m2: massa do conjunto frasco + agregado miúdo + água até a marca de 500 cm³ (g);

ms: massa do agregado saturado de superfície seca (g);

m: massa do agregado seco em estufa entre $105 \pm 5^\circ\text{C}$ (g);

ρ_a : massa específica da água (g/cm^3).

A massa unitária foi executada com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006), para a qual foi encontrado um valor de $1,65 \text{ g}/\text{cm}^3$. Conforme ilustração da Figura 11, uma amostra de agregado miúdo foi despejada em um recipiente com volume conhecido. A altura de queda do material seguiu o “Método C” da respectiva norma, a qual indica que o agregado deve ser despejado a uma altura máxima de 50 mm acima da borda superior do recipiente. Ao final do ensaio, a massa unitária é dada pelo cálculo da Equação 2.

Figura 11 - Procedimento para determinação da massa unitária da areia



Fonte: Da Autora (2018).

$$\delta = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (2)$$

Onde:

δ : massa unitária (g/cm^3)

m_1 : massa do recipiente + agregado (g);

m_2 : massa do recipiente (g);

V : volume do recipiente (cm^3).

3.4 Brita

A brita basáltica escolhida para a mistura de concreto é do tipo 1, também disponibilizada pelo LATEC.

3.4.1 Determinação Granulométrica

O ensaio para determinar a faixa granulométrica da brita foi executado conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003) com uma amostra de cerca de 1000 g de brita seca em estufa entre $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Foram utilizadas peneiras de série normal e intermediária conforme padrões da NBR NM-ISO 3310 -1 (ABNT, 2010), de malha 19, 12,5, 9,5, 6,3 e 4,75 mm. O ensaio foi realizado para duas amostras de agregado.

A amostra de brita foi despejada em um conjunto de peneiras conforme Figura 12, o qual, para melhor separação das frações granulométricas, foi levado ao agitador de peneiras por 5 minutos.

Figura 12 - Peneiramento do agregado graúdo



Fonte: Da Autora (2018).

Ao final do ensaio, cada fração de brita retida nas peneiras foi pesada em uma balança com precisão de 0,1 g. Os valores obtidos para a distribuição granulométrica das duas amostras de brita estão indicados na Tabela 8.

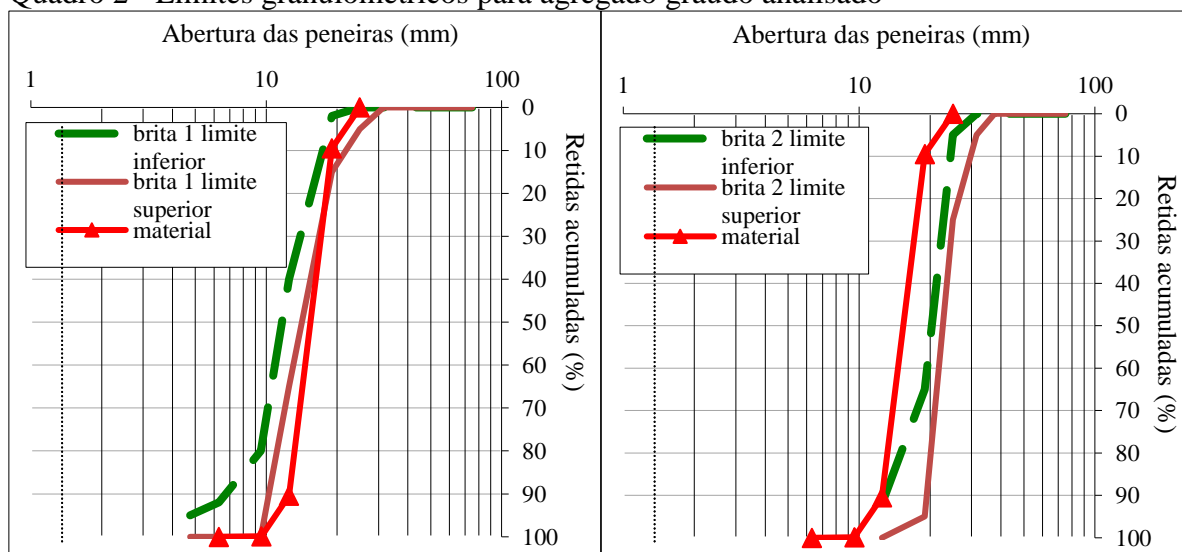
Tabela 8 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Malha (mm)	Massa (gr)		Retida (%)		Retida Variações (%)	Retida Média (%)	Retida acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
19	85,0	112,3	8,5	10,5	2,0	9,5	9,5
12,5	802,8	872,2	80,3	81,6	1,3	80,9	90,4
9,55	111,1	83,3	11,1	7,8	3,3	9,4	99,8
6,3	1,4	1,4	0,1	0,1	0,0	0,1	100
4,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fundo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	1000,3	1069,2					

Fonte: Da Autora (2018).

Conforme a classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009) apresentada na Tabela 5 do item 2.2.3.2 a brita analisada foi comparada com os limites para brita 1 e brita 2. Observa-se no Quadro 2, que a curva granulométrica da brita em questão não se classifica como brita 2; porém, se enquadra parcialmente nos limites da brita 1. O ensaio foi realizado outras vezes, porém em nenhuma houve 100% de concordância com os limites da brita 1.

Quadro 2 - Limites granulométricos para agregado graúdo analisado



Fonte: Da Autora (2018).

3.4.2 Determinação da massa específica e massa unitária

A massa unitária foi executada com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006) para a qual foi encontrado um valor de 1,48 g/cm³. Conforme ilustração da Figura 13, uma amostra de agregado miúdo foi despejada em um recipiente com volume conhecido. A altura de queda do material seguiu o “Método C” da respectiva norma, a qual indica que o agregado deve ser despejado a uma altura máxima de 50 mm acima da borda superior do recipiente. Ao final do

ensaio, a massa unitária é dada pelo cálculo da Equação 2 descrita no item 3.3.2.

Figura 13 - Procedimento para determinação da massa unitária da brita



Fonte: Da Autora (2018).

A massa específica foi encontrada realizando-se o ensaio da NBR NM 53 (ABNT, 2009). Este parâmetro provém da relação entre a diferença de massa do agregado diante do comportamento da brita quando submersa, saturada de superfície seca e seca em estufa. Deste modo, uma amostra de 2 kg de brita (isento de material passante pela peneira de 4,75 mm) foi deixada em repouso em um recipiente com água por 24 horas. Após este período a brita foi retirada da água e envolvida em um pano absorvente, como indica a Figura 14.

Figura 14 - Brita em condição de saturação com superfície seca



Fonte: Da Autora (2018).

Após a remoção da água superficial, a massa da amostra saturada de superfície seca foi registrada. Logo após, a amostra foi depositada em um cesto de arame, com abertura inferior a 3,35 mm para conter o material, sendo pesada em água (ma). Ambas as situações estão indicadas na Figura 15.

Figura 15 - Procedimento para determinação da massa específica da brita



Fonte: Da Autora (2018).

O agregado graúdo foi retirado do cesto de arame e seco até a massa constante, em uma estufa entre $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Após atingir a temperatura ambiente, sua massa foi registrada (m). Deste modo, o cálculo para determinação da massa específica é dado pela Equação 3, o qual resultou no valor de $2,75 \text{ g/cm}^3$.

$$\gamma = \frac{m}{m - m_a} \quad (3)$$

Onde:

γ : massa específica (g/cm^3);

m: massa da amostra seca em estufa (g);

m_a : massa da amostra em água (g).

3.5 Aditivo Superplastificante

Foram utilizados dois tipos de aditivos. Para o ensaios de determinação da capacidade pozolânica do resíduo de beneficiamento, foi utilizado o aditivo plastificante da marca MC-Bauchemie, modelo MC PowerFlow 4000. Segundo informações comerciais, o produto possibilita dosagens econômicas, mantendo a trabalhabilidade mesmo com baixas proporções de água no concreto, devendo ser utilizado na dosagem de 0,2 a 5% sobre a massa de cimento (Grupo MC-Bauchemie).

Nas misturas de concreto em betoneira estacionária, foi utilizado o superplastificante

Tec-Flow 8000. O produto confere elevada plasticidade a mistura, sendo comumente empregado na produção de concretos de alto desempenho e auto-adensáveis; apresenta-se na forma de um líquido alaranjado, e segundo fabricante, deve ser utilizado entre 0,3 e 2% sobre a massa de cimento (GCP *Applied Technologies*).

3.6 Resíduo de beneficiamento de ágata

O resíduo de beneficiamento de ágata inicialmente tem característica de uma mistura fina, porém pastosa, oleosa e com fragmentos de pedras. Para reduzir o resíduo a uma mistura seca, esse passa por um processo de retirada de óleo através da inserção de água e tombamento em betoneira, conforme Figura 16 registrada no pátio da indústria. A resultante do processo é um material esbranquiçado e com odor de óleo.

Figura 16 - Processo de retirada de óleos do resíduo



Fonte: Da Autora (2018).

A amostra retirada para ensaios físicos e químicos seguiu a NBR NM 26: Agregados – amostragem (ABNT, 2009), sendo coletada em três porções aproximadamente iguais a partir de três tonéis aleatórios, de maneira a totalizar uma massa de 25 kg. Posteriormente, o material foi transportado até o LATEC, onde foi seco em estufa por 24 horas, em temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$.

Para possibilitar a realização dos diversos estudos de caracterização com menor volume de material, foram seguidos os passos da NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório (ABNT, 2001). A cada ensaio uma parcela de

resíduo de beneficiamento de ágata foi quarteada de acordo com o Método “B” descrito em norma, como segue ilustração na Figura 17.

Figura 17 - Quarteamento da amostra de resíduo de beneficiamento de ágata para ensaios de laboratório



Fonte: Da Autora (2018).

3.6.1 Características químicas

Para conhecimento e atestado de um novo material relacionado com a tecnologia do concreto e a engenharia civil, é importante o conhecimento de suas propriedades químicas. Como o processo de beneficiamento de ágatas faz o uso de produtos químicos, como óleos e detergentes, é importante para fins ambientais conhecer se, mesmo após a redução do lodo para estado sólido, esses componentes ainda se fazem presentes no resíduo o que consequentemente poderá vir a influenciar no desempenho do produto final.

3.6.1.1 Determinação do teor de óleo

De acordo com a Norma Técnica NTS 005 (SABESP, 1997, p. 3) “os óleos e graxas caracterizam-se principalmente por sua baixa solubilidade na água e sua consequente separação da fase aquosa”. Portanto, a extração de óleo deu-se pela submissão de uma amostra do resíduo de beneficiamento de ágata ao método *Soxhlet* apresentado pela norma técnica NTS 005 (SABESP, 1997): Óleos e graxas – método de ensaio.

O método consistiu na inserção e circulação em sistema fechado do solvente hexano (FIGURA 18), a 180°C dentro de um equipamento determinador de gordura contendo recipientes de vidro de massa conhecida (f1) com aproximadamente 2g de resíduo cada (a). Após a retirada do solvente, os frascos contendo a quantidade de óleo extraída (f2) foram dispostos em dissecadores de vidro até que atingissem a temperatura ambiente (FIGURA 19). A quantidade de óleo foi determinada em função da quantidade de massa da amostra que se solubilizou e ficou retida no fundo dos frascos de vidro, dada pela Equação 4.

Figura 18 - Sistema de extração *Soxhlet*



Fonte: Da Autora (2018).

Nota: Determinador de gordura da marca TECNAL, modelo TE-044-8/50.

Figura 19 - Dissecador para atingir a temperatura ambiental



Fonte: Da Autora (2018).

Nota: O líquido com coloração amarelada nos frascos indica a presença de óleo nas amostras do resíduo.

$$\text{óleo (\%)} = \frac{f2 - f1}{A} * 100 \quad (4)$$

Onde:

f2: massa do conjunto frasco de vidro + amostra (g);

f1: massa do frasco de vidro (g);

A: massa da amostra (g).

3.6.1.2 Composição mineralógica

A composição mineralógica é necessária para indicar os minerais presentes no resíduo através da identificação das fases cristalinas dos sólidos. O ensaio foi realizado através de laboratório especializado pelo método de Difração por Raios X (DRX) com o equipamento Philips X'Pert Pro PW 3040/00, com radiação de cobre operando a 40 kV e 40 mA, com 2θ variando entre 5° a 75°, passo 0,02° e tempo de contagem de 5s/ passo.

Para análise incidiu-se sobre as partículas atômicas de uma amostra diferentes comprimentos de onda de radiação, Raio X. Os picos que representam as distâncias entre os planos cristalinos, conhecidas como interferências, formam uma difração. Os picos estabelecidos foram comparados com padrões tabelados pelo banco de dados da *International Union of Crystallography*.

3.6.1.3 Composição química

A composição química é importante para determinar os óxidos em base calcinada a 1000 °C existentes no resíduo. Também foi realizada através de laboratório especializado, desta vez pelo método de Fluorescência de Raios X (FRX), com o uso do equipamento Philips P2400 X'Pert com pastilhas de calibração para detecção dos elementos.

O ensaio utilizou o método de pastilhas fundidas dado pela NBR ISO 12677 (ABNT, 2011), através do qual, a amostra de pó de ágata foi calcinada a 1000 ± 10 °C, para moldagem das pastilhas. Foram analisadas as radiações fluorescentes decorrentes das transições

eletrônicas de elétrons de camadas internas para externas quando Raios X incidem sobre as pastilhas. Os resultados são comparados às características de cada elemento químico.

3.6.2 Características físicas

Os ensaios para determinação das características físicas do resíduo de beneficiamento de ágata foram realizados no LATEC. Antes de cada ensaio a amostra de material foi reduzida, segundo a NBR NM 27 (ABNT, 2001), conforme visto anteriormente.

3.6.2.1 Determinação granulométrica por peneiramento

A análise granulométrica foi realizada conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). As peneiras utilizadas são tanto da série normal quanto intermediária, da marca Solotest, compostas por tela inox de série normal conforme padrões da NBR NM-ISO 3310 -1 (ABNT, 2010).

Primeiramente o resíduo foi destorroado, e em seguida despejou-se 1000 g do material em um conjunto de peneiras, como indica a Figura 20. Para maior eficiência na separação, o conjunto foi levado ao agitador de peneiras em duas seções de 5 minutos cada.

Ao fim do ensaio as frações de material retido nas peneiras foram pesadas em uma balança de precisão de 0,1 g. Com base nesses valores, tornou-se possível encontrar o Diâmetro Máximo Característico (DMC), ou nominal, o qual é o valor correspondente à peneira de série normal em que o retido acumulado é inferior ou igual a 5%.

Figura 20 - Conjunto de peneiras utilizadas para ensaio granulométrico com o resíduo de beneficiamento de ágata



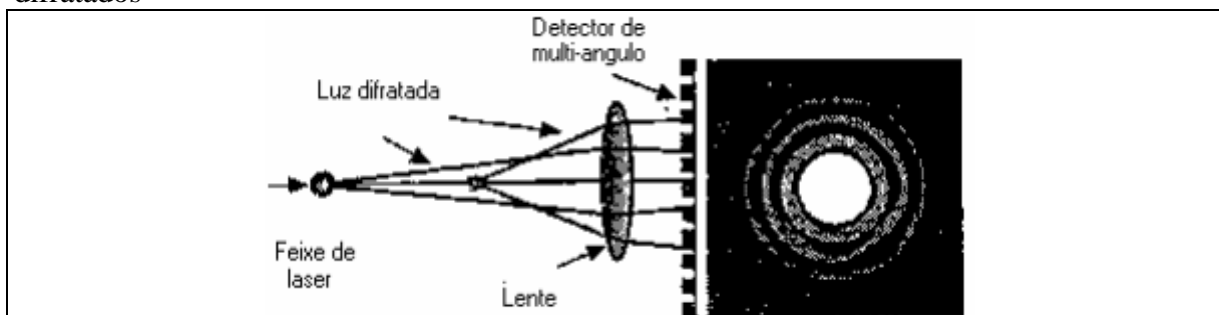
Fonte: Da Autora (2018).

3.6.2.2 Determinação granulométrica a *laser*

A análise de tamanho de partículas por raio laser foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em Porto Alegre/RS. A análise foi executada com uma composição de resíduo de beneficiamento de ágata de massa igual a 121 g.

Uma pequena amostra do material foi dispersa em um fluído em movimento, simultaneamente submetido à incidência de um feixe de luz de raio *laser*. Esta incidência foi capaz de identificar a descontinuidade do fluído devido ao tamanho das partículas da amostra. O fato do raio laser sofrer refração, difração, absorção e reflexão, conforme Figura 21, resulta em uma leitura de comprimento de onda que depende do formato e tamanho da partícula. Detectores medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada que possibilitam a identificação das faixas granulométricas por meio de um gráfico de dispersão que indica a leitura do tamanho das partículas (PAPINI; LEAL NETO, 2006).

Figura 21 - Interação do raio de luz com uma partícula esférica resultando em ângulos difratados



Fonte: Allen apud Papini e Leal Neto (2006, p. 5026).

3.6.2.3 Determinação de material pulverulento

A quantidade de material passante na peneira de 0,075 mm, dito pulverulento, foi encontrada através do ensaio dado pela NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem (ABNT, 2003).

O material ensaiado foi previamente seco em estufa entre $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Em seguida, de acordo com o resultado de DMC, uma amostra de 100 g (M1) foi selecionada para ensaio (TABELA 9). O DMC do material é definido com base nos resultados de determinação granulométrica encontrados para o item 3.6.2.1.

Tabela 9 - Quantidade mínima de amostra para ensaio

Diâmetro máximo nominal (mm)	Massa mínima (g)
2,36	100
4,75	500
9,5	1000
19	2500
37,5 ou superior	5000

Fonte: NBR NM 46 (ABNT, 2003, p. 3).

A amostra de material foi colocada na peneira de 75 μm seguida de lavagem constante até o momento em que a água passante pela peneira não apresentasse mais partículas sólidas (FIGURA 22). Deste modo, o material restante na peneira, foi removido e seco em estufa para conhecimento de sua massa (M2), sendo o valor empregado na Equação 5.

Figura 22 - Lavagem da amostra



Fonte: do autor, (2018).

$$M_p = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100 \quad (5)$$

Onde:

M_p : material pulverulento (%);

M_1 : total de amostra utilizada para ensaio (g);

M_2 : amostra retida na peneira 0,075mm (g).

3.6.2.4 Determinação da massa específica e massa unitária

A massa unitária foi executada com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Conforme Figura 23, o resíduo de beneficiamento de ágata foi despejado dentro de um recipiente com volume conhecido a uma altura de 50 mm conforme indica o “Método C” da respectiva norma. Ao final do ensaio, a massa unitária é dada pelo cálculo da Equação 2 descrita no item 3.3.2.

Figura 23 - Procedimento para determinação da massa unitária do resíduo



Fonte: Da Autora (2018).

A massa específica foi determinada segundo a NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica (ABNT, 2017). O resultado é dado pela relação da massa de material utilizada para teste e o volume de líquido deslocado dentro do frasco de *Le Chatelier*.

O líquido utilizado para ensaio foi querosene (não reagente com o material), como mostra a Figura 24. Para ensaio foi selecionada uma amostra seca de resíduo passante na peneira de 0,15 mm.

Figura 24 - Materiais necessários à realização do ensaio da massa específica do resíduo de beneficiamento de ágata



Fonte: Da Autora (2018).

Nota: Ilustração do frasco de *Le Chatelier*, funis e querosene utilizados para ensaio.

Primeiramente encheu-se o frasco até a marca de 0 a 1 cm³, o qual permaneceu em repouso por 30 minutos para entrar em equilíbrio térmico com o ambiente. Em seguida, como

apresenta a Figura 25, a amostra de resíduo foi adicionada de maneira que a querosene se elevasse entre a marca de 18 a 24 cm³, sendo a massa específica calculada pela Equação 6.

Figura 25 - Materiais dentro do frasco de *Le Chatelier*



Fonte: Da Autora (2018).

$$\gamma = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Onde:

γ : massa específica (g/cm³);

m : massa de resíduo de beneficiamento de ágata utilizada para ensaio (g);

v : diferença entre leitura inicial e final do volume de querosene dentro do frasco de *Le Chatelier* (cm³).

3.6.2.5 Determinação do índice de atividade pozolânica do material

O resíduo foi ensaiado para testar se detém capacidade pozolânica de reação nos processos de hidratação do cimento. Os procedimentos foram realizados segundo NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias (ABNT, 2014), em conjunto com a norma de apoio NBR 7215: Cimento *Portland* - Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1996).

Para ensaio foram misturados 2 tipos de argamassa, conforme Figura 26: Argamassa A, argamassa tradicional para referência; Argamassa B, argamassa com resíduo de beneficiamento de ágata. As quantidades dos materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 10

Figura 26 - Materiais utilizados para cada mistura de argamassa



Fonte: Da Autora (2018).

Nota: No quadro (a) estão dispostos os materiais constituintes da Argamassa A, cimento, frações de areia e água. E, no quadro (b) encontram-se o cimento, frações de areia, resíduo de beneficiamento de ágata e água, componentes da Argamassa B.

Tabela 10 - Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova cilíndricos

Material	Massas (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento ^a	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material pozolânico ^d	-	156 ± 0,2
Areia normal	1872 ^b	1872 ^b
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo superplastificante	-	^c

Notas:

^{a)} O cimento utilizado foi o CP II-F-40;

^{b)} A areia foi disposta em 4 frações de $468 \pm 0,3$, conforme valores da Tabela 11 e Figura 27.

^{c)} A quantidade de aditivo utilizado foi o suficiente para manter a consistência normal da Argamassa B em ± 10 mm do obtido com Argamassa A;

^{d)} O resíduo de beneficiamento de ágata assumiu a quantidade de material pozolânico.

Fonte: Adaptado pelo autor com base nos valores da NBR 5752 (ABNT, 2014, p. 3).

Tabela 11 - Frações granulométricas da areia para o ensaio da NBR 5752 (ABNT, 2014)

Material retido entre as peneiras de abertura nominal de	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

Fonte: NBR 7214 (ABNT, 1982, p. 2).

Figura 27 - Frações granulométricas da areia utilizadas para ensaio



Fonte: Da Autora (2017).

Nota: (a) areia fina; (b) areia média fina; (c) areia média grossa; (d) areia grossa.

Os materiais foram misturados, seguindo as etapas da NBR 7215 (ABNT, 1996), em uma amassadeira eletro-mecânica com cuba de aço de acordo com a Figura 28. Amassadeira da marca Pavitest modelo I-3010 da Contenco Indústria e Comercio LTDA..

Figura 28 - Misturador utilizado para amassamento de argamassas



Fonte: Da Autora (2017).


A verificação da consistência foi realizada segundo NBR 7215 (ABNT, 1996) por meio de ensaio na mesa para índice de consistência, também chamada de *flow table*. O aparelho utilizado e ilustrado pela Figura 29 é da marca Solotest modelo com contador de golpes automático para 220V-50HZ. O Quadro 3 apresenta as medidas de espalhamento para as misturas, e a quantidade de aditivo utilizada na argamassa B.

Figura 29 - Mesa para índice de consistência, *flow table*



Fonte: Da Autora (2017).

Quadro 3 - Valores de consistência obtidos na mesa de espalhamento, *flow table*

	3 medidas de espalhamento na <i>flow table</i> (cm)	
	Argamassa A	Argamassa B
	24,3	23,9
	24,7	24
	25,1	23,6
	Média	Média
	24,7	23,83 ^a
a) com 0,45g de aditivo representando 0,096% da massa total de cimento dentro da Argamassa B. Aditivo marca MC-Bauchemie, modelo MC PowerFlow 4000. Valor de espalhamento se enquadra em ± 10 mm da Argamassa A (referência).		

Fonte: Da Autora (2017).

Após a verificação do índice de consistência, 6 corpos de prova para cada argamassa foram moldados em formas cilíndricas com diâmetro interno de $50 \pm 0,1$ mm e altura de $100 \pm 0,2$ mm, de acordo com a Figura 30. Os mesmos foram submetidos à cura inicial ao ar, e posteriormente seguiram em cura úmida (câmara de cura) até o momento de ruptura.

Figura 30 - Corpos de prova para teste de resistência e verificação do índice de desempenho



Fonte: Da Autora (2017).

Foram elaborados 2 momentos para ruptura dos corpos de prova por ensaio de compressão, 28 e 63 dias, ou seja, 3 exemplares para cada idade. Com os valores obtidos para resistência, o índice de atividade pozolânica pode ser calculado com base na Equação 7. A Figura 31 apresenta o momento de ruptura. A prensa hidráulica utilizada possui acionamento elétrico, capacidade de 2000 KN, sendo modelo SSH300 da Linha PC (prensa de compressão) e marca EMIC.

$$Icimento = \frac{fcB}{fcA} * 100 \quad (7)$$

Onde:

Icimento: índice de desempenho com cimento *Portland* para o período de tempo até ruptura (%);

fcA: resistência à compressão para Argamassa A (MPa);

fcB: resistência à compressão para Argamassa B (MPa).

Figura 31 - Ruptura de corpo de prova de argamassa em prensa hidráulica



Fonte: Da Autora (2017).

3.7 Dosagem

O traço utilizado para a dosagem do concreto é do tipo 1:2:3:0,5 (cimento, areia, brita, relação a/c), dosado pelo método ABCP para abatimento referência de máximo 100mm e mínimo de 25mm. A substituição parcial da areia pelo resíduo de beneficiamento de ágata é dada em proporções indicadas na Tabela 12, a qual apresenta os valores de traço unitário referidos a cada dosagem.

Tabela 12 - Traços unitário definidos para estudo

TRAÇO	Cimento	Areia	Resíduo	Brita	Água
Referência	1	2	-	3	0,5
Areia 95% Resíduo 5%	1	1,9	0,1	3	0,5
Areia 92,5% Resíduo 7,5%	1	1,85	0,15	3	0,5
Areia 90% Resíduo 10%	1	1,8	0,2	3	0,5
Areia 87,5% Resíduo 12,5%	1	1,75	0,25	3	0,5
Areia 85% Resíduo 15%	1	1,7	0,3	3	0,5

Fonte: Da Autora (2017).

Além disso, com base na Equação 8 e valores de traço unitário, foram realizados cálculos para ajuste dos materiais em função das modificações da quantidade de areia, o que resultou, na Tabela 13, nos valores de massa dos agregados necessários para um volume de dosagem de 28 corpos de prova cilíndricos: 25 necessários para os ensaios no estado endurecido; e 3 como margem de erro para eventuais perdas durante a mistura. A escolha por

substituições em pequenas porcentagens (de 2,5 em 2,5%) deve-se ao fato de que nas pesquisas já realizadas por Giovanella (2017) e Bruxel (2012), os melhores resultados encontrados para as peças estudadas ocorreram com pequenas substituições de um material comum pelo resíduo de beneficiamento.

$$C = \frac{V}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{1}{\gamma_a} + \frac{1}{\gamma_b} + \frac{1}{\gamma_r} + a/c} \quad (8)$$

Onde:

C: massa de cimento para volume de concreto (kg);

V: volume de concreto (L ou dm³);

γ_c : massa específica do cimento (g/cm³);

γ_a : massa específica da areia (g/cm³);

γ_b : massa específica da brita (g/cm³);

γ_r : massa específica do resíduo de beneficiamento de ágata (a relação não deve ser considerada para determinação dos materiais do traço padrão) (g/cm³);

a/c: relação água cimento.

Tabela 13 - Traço em massa para moldagem de 28 corpos de prova

Materiais	Valores em massa para mistura do concreto (kg)					
	Referência	A 95% R 5%	A 92,5% R 7,5%	A 90% R 10%	A 87,5% R 12,5%	A 85% R 15%
Cimento	16,181	16,181	16,181	16,181	16,181	16,181
Areia	32,362	30,744	29,935	29,126	28,317	27,508
Resíduo de beneficiamento de ágata	-	1,618	2,427	3,236	4,045	4,854
Brita	48,544	48,544	48,544	48,544	48,544	48,544
Água	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09

Fonte: Da Autora (2017).

3.8 Determinação da consistência do concreto no estado fresco

Após a mistura do concreto em betoneira estacionária, foi verificada a sua consistência pelo procedimento descrito na NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998). O aparelho utilizado para testar a consistência do concreto possui forma troncônica de diâmetro de 10 a 20 cm e altura de 30 cm. Dentro dele o concreto foi colocado em 3 camadas, cada uma recebendo 25 golpes com barra de aço 16 mm de diâmetro.

A medida de consistência, chamada de abatimento ou *Slump*, é a medida da diferença de altura entre o molde e a massa do concreto, como indica a Figura 32.

Figura 32 - Medida do abatimento



Fonte: Da Autora (2018).

3.8.1 Moldagem dos corpos de prova

Ainda no estado fresco foram moldados 25 corpos de prova de cada traço (FIGURA 33). Para moldagem seguiu-se a NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015). Os corpos de prova foram moldados em fôrmas cilíndricas de $10 \pm 0,1$ cm e $20 \pm 0,2$ cm, em 3 camadas de 12 golpes cada.

Figura 33 - Corpos de prova



Fonte: Da Autora (2018).

Nota: O quadro (a) apresenta os moldes para os corpos de prova; antes do preenchimento com a mistura cimentícia passou-se desmoldante para facilitar a retirada do concreto após endurecimento. O quadro (b) indica os moldes preenchidos com concreto e identificados conforme o traço.

Para a determinação da massa específica do concreto em estado fresco, 3 moldes para cada traço foram pesados, antes e após o enchimento com a massa de concreto. Após a moldagem, os corpos de prova de concreto curaram inicialmente ao ar (entre 24 a 48 horas), e então, seguiram para a câmara úmida, onde permaneceram até o momento da execução dos ensaios em estado endurecido.

3.9 Ensaios para concreto no estado endurecido

Para o concreto no estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, compressão por tração diametral, absorção por capilaridade, índice de vazios, resistência à perda de massa por abrasão e determinação de óleo. A descrição dos respectivos ensaios está apresentada nos itens que seguem.

3.9.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão foi realizada conforme a NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2007). A resistência do concreto foi medida para as idades de 7, 28, e 56 dias. De acordo com a Figura 34, os corpos de prova foram submetidos à ruptura por compressão através de uma prensa hidráulica com capacidade de 2000 kN, modelo SSH300 da Linha PC (prensa de compressão) da marca EMIC.

Figura 34 - Ruptura dos corpos de prova de concreto em prensa hidráulica



Fonte: Da Autora (2018).

3.9.2 Resistência à tração

A resistência à tração foi realizada segundo ensaio padronizado pela NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011). Para este ensaio a resistência foi medida apenas para as idades de 7 e 28 dias. Os corpos de prova foram submetidos a prensas hidráulicas com ajuste para dissipação das forças em linhas axiais opostas o que resulta em uma compressão por tração diametral (FIGURA 35). Para o ajuste dos resultados de resistência foi utilizada a Equação 9, também indicada pela NBR 7222 (ABNT, 2011).

Figura 35 - Resistência à compressão por tração diametral



Fonte: Da Autora (2018).

Nota: Imagens indicam o dispositivo metálico utilizado para posicionar o corpo de prova na prensa hidráulica.

$$f_{ct, sp} = \frac{2 * F}{\pi * d * l} \quad (9)$$

Onde:

$f_{ct, sp}$: resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F: força máxima obtida no ensaio (N);

d: diâmetro do corpo de prova (mm);

l: altura do corpo de prova (mm).

3.9.3 Determinação da absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água foi executada conforme a NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade (ABNT, 2012). A absorção de água foi analisada para três corpos de prova de cada traço, na idade de 28 dias, previamente secos em estufa (FIGURA 36), quando dispostos sobre uma lâmina d'água de 5 ± 1 mm acima da face inferior (FIGURA 37), durante 3, 6, 24, 48, 72 h. Os valores para cada tempo foram aplicados na Equação 10.

Figura 36 - Corpos de prova na estufa $105 \pm 5^\circ\text{C}$



Fonte: Da Autora (2018).

Figura 37 - Determinação da absorção de água por capilaridade



Fonte: Da Autora (2018).

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (10)$$

Onde:

C: absorção de água por capilaridade (g/cm²);

A: massa do corpo de prova úmido (g);

B: massa do corpo de prova seco em estufa (g);

S: área da seção transversal do corpo de prova (cm²).

3.9.4 Determinação da absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão também foi analisada para três corpos de prova de cada traço, na idade de 28 dias, previamente secos em estufa (105 ± 5°C). Utilizou-se a NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica (ABNT, 2009). A massa para cada corpo de prova foi analisada após 24, 48 e 72 h de imersão em água (FIGURA 38); e ainda após, completadas as 72 h, a massa também foi analisada para 5 h de fervura (FIGURA 39) e com pesagem imersa em água.

Figura 38 - Corpos de prova imersos em água



Fonte: Da Autora (2018).

Figura 39 - Fervura de corpos de prova



Fonte: Da Autora (2018).

A absorção pode ser identificada pela Equação 11, sendo que é possível fazer uma relação tanto com a saturação após 72 h de imersão em água, quanto com a saturação por fervura de 5 h.

$$Ab(\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (11)$$

Onde:

Ab: percentual de absorção de água (%);

M_{sat}: massa do corpo de prova saturado (g);

M_s: massa do corpo de prova seco em estufa (g).

3.9.4.1 Índice de vazios e massa específica

Através da NBR 9778 (ABNT, 2009), também foi possível identificar o percentual de espaços vazios dentro do concreto (EQUAÇÃO 12), e a sua massa específica (EQUAÇÃO 13).

$$I(\%) = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} * 100 \quad (12)$$

Onde:

I: percentual de índice de vazios (%);

M_{sat}: massa do corpo de prova saturado (g);

M_s: massa do corpo de prova seco em estufa (g);

M_i: massa do corpo de prova satura, imerso em água (g).

$$\gamma = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad (13)$$

Onde:

γ: massa específica do concreto (g/cm³);

3.9.5 Determinação da resistência à abrasão

O ensaio de resistência a abrasão foi realizado conforme a norma do comitê internacional *American Society for Testing and Materials* (ASTM), C 1747 (ASTM, 2013): *Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion*. De acordo com definições dadas pela normativa, a abrasão indica a perda de massa e profundidade das estruturas e peças de concreto mediante ação de agentes abrasivos, o que consequentemente resulta na perda de resistência mecânica.

Três corpos de prova de cada traço com idade de 35 dias, previamente secos em estufa entre 105 ± 5°C e com massa conhecida, foram inseridos em um moinho de bolas para minérios do tipo *Bond*, da marca MARCONI, modelo MA701/21 com capacidade para 21 L,

como indica a Figura 40. A velocidade de rotação foi ajustada entre 30 rpm e 33 rpm, até completar 500 rotações. A norma prescreve a utilização do modelo moinho Los Angeles, mas neste caso a opção de utilizar o moinho de bolas não interfere na velocidade de rotação, tampouco na capacidade, uma vez que 21 L admite a quantia de corpos de prova em questão.

Figura 40 - Moinho de bolas para ensaio de resistência à abrasão



Fonte: Da Autora (2018).

A perda de massa provém do atrito dos corpos de prova entre si e com o tambor de aço do moinho, não sendo aplicadas cargas abrasivas extras como, por exemplo, esferas de aço. Ao término das rotações os corpos de provas foram novamente pesados, para que fosse possível fazer a relação da perda de massa por meio da Equação 14.

$$P(\%) = \frac{M_f - M_i}{M_i} * 100 \quad (14)$$

Onde:

P: perda de massa por abrasão (%);

M_f: massa final do corpo de prova (g);

M_i: massa inicial do corpo de prova (g).

3.9.6 Determinação do teor de óleo

A determinação dos óleos seguiu o mesmo ensaio químico feito para o resíduo bruto: método *Soxhlet* apresentado pela norma técnica NTS 005 (SABESP, 1997): Óleos e graxas – método de ensaio, item 3.6.1.1.

O intuito foi identificar se a quantidade de hidrocarbonetos derivados de óleos e graxas presente no resíduo de beneficiamento, ainda se mantém em quantidades que possam vir a caracterizar o produto final em alguma classe de risco ambiental e inviabilizar o seu uso na construção civil.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Características químicas do resíduo de beneficiamento de ágata

Os resultados referentes à caracterização química, mineralógica e determinação da quantidade de óleo presente no resíduo estão dispostos nos itens seguintes.

4.1.1 Extração de óleo

O ensaio de extração de óleos a partir da NTS 005 (SABESP, 1997) apontou uma quantia de 5,21% deste hidrocarboneto remanescente do processo de beneficiamento. A presença de óleo na mistura indica que o tratamento realizado no pátio da indústria de beneficiamento não atinge resultados satisfatórios de remoção, de modo que não evita a geração de um resíduo sólido oleoso.

O mesmo percentual de óleo diesel, quando relacionado à NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004), posiciona o resíduo de beneficiamento de ágata na classe de agressividade I, sendo perigoso por conter óleos que propiciam toxicidade, inflamabilidade e patogeneicidade. Ou seja, o resíduo é um potencial causador de danos ambientais, por causar a contaminação dos solos e/ou lençóis freáticos. Este fato requer, por parte das indústrias beneficiadoras, um gerenciamento deste resíduo, seja por disposição final em aterros ou por contratação de serviços terceirizados de tratamento de resíduos. Tais questões, muitas vezes, demandam custos de transporte e serviços, justificando na maioria das vezes a estocagem do resíduo em tonéis no pátio da indústria.

4.1.2 Composição química e mineralógica

O composto químico em maior abundância dentro do resíduo é o dióxido de silício (SiO_2), também chamado de sílica, como indica a Tabela 14. A quantidade expressiva deste composto se equipara aos resultados encontrados por Bruxel et al. (2012), que obteve o valor de 94,77% de sílica para resíduos do beneficiamento de ágatas e ametistas.

Tabela 14 - Composição química da amostra de resíduo de beneficiamento de ágata

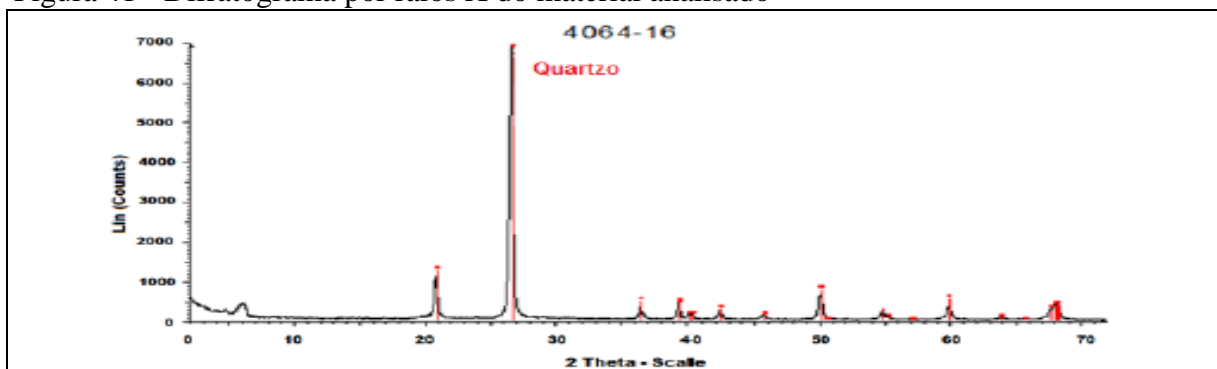
Elemento	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	TiO_2	PF*
(%)	0,13	<0,05	0,24	<0,05	<0,05	<0,05	0,07	<0,05	97,43	<0,05	1,95

PF*: perda ao fogo

Fonte: Da Autora (2017).

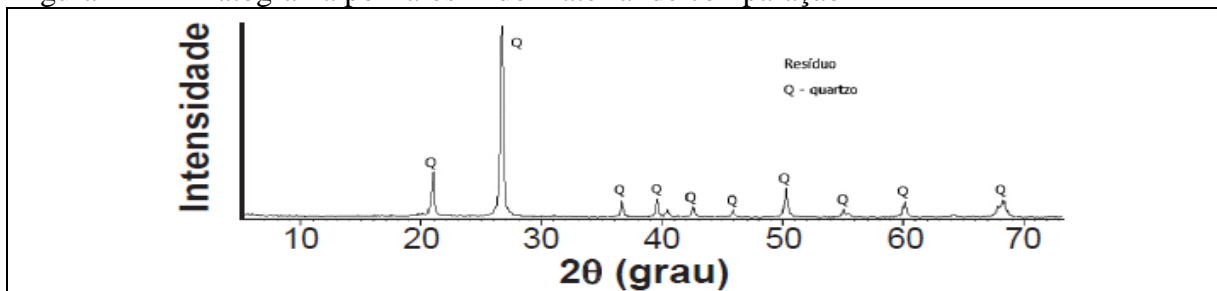
Os resultados obtidos para determinação mineralógica expressos pelo difratograma da Figura 41, também foram comparados aos de Bruxel et al. (2012) (FIGURA 42). Ambos os resultados expressam a predominância de quartzo na forma cristalina no resíduo, sem halos amorfos. Além disso, picos concentrados em $2\theta=21^\circ$ e $2\theta=27^\circ$ indicam as fases cristalinas do composto sílica, o qual constitui o mineral de quartzo. Isto afere que o material analisado não é amorfo, ou seja, não tem reatividade pozolânica, tal como ocorreu na análise da cinza do bagaço de cana de açúcar estudada por Paula et al. (2009).

Figura 41 - Difratograma por raios X do material analisado



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 42 - Difratograma por raios X do material de comparação



Fonte: Bruxel et al. (2012, p. 4).

Tanto a análise química quanto mineralógica concordam entre si, pois os geodos que se desenvolvem nas cavidades de rochas basálticas crescem a partir da cristalização de fluídos ricos em SiO_2 que, quando submetidos a quedas de pressão e temperatura, se reverterem em minerais de variados tamanhos, dentre eles o quartzo (GUZZO, 2009). Deste modo, a ágata é considerada uma variedade cristalina do mineral quartzo, assim como, segundo Souza (1996), outras pedras preciosas e semipreciosas também são originadas a partir de variações cristalinas de diferentes minerais, que também conferem diferentes colocações. O mesmo autor indica que a mineralização ocorre de fora para dentro nos geodos, podendo haver em sua parte central regiões de quartzo mal cristalizado, o que resulta em uma coloração esbaquiçada nas peças de ágatas, como observa-se na Figura 43.

Figura 43 - Geodo com ágata



Fonte: Da Autora (2018).

4.2 Características físicas do resíduo de beneficiamento de ágata

Os resultados referentes à determinação granulométrica do resíduo, massa específica e unitária, quantidade de material pulverulento e índice de desempenho com cimento *Portland*, estão dispostos nos itens seguintes.

4.2.1 Análise granulométrica

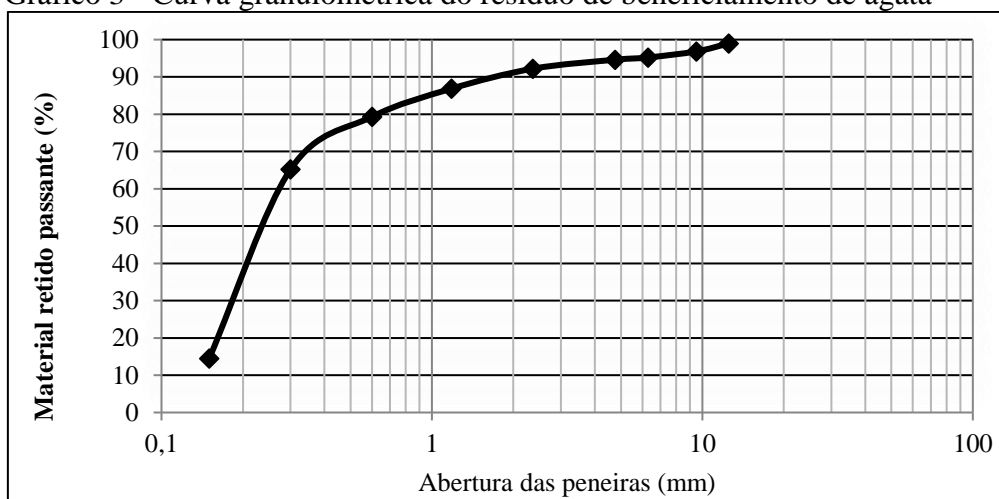
Os dados obtidos a partir do ensaio de peneiramento estão apresentados na Tabela 15 e melhor ilustrados no Gráfico 3.

Tabela 15 - Distribuição granulométrica do resíduo de beneficiamento de ágata

Malha	Abertura (mm)	Massa (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Passante (%)
1/2"	12,5	10,4	1,04	1,04	98,96
3/8"	9,5	21,2	2,12	3,16	96,84
1/4"	6,3	16,3	1,63	4,79	95,21
4	4,75	6,1	0,61	5,4	94,6
8	2,36	24	2,4	7,8	92,2
16	1,18	53,6	5,36	13,16	86,84
30	0,6	75,3	7,53	20,69	79,31
50	0,3	141,2	14,12	34,81	65,19
100	0,15	507,3	50,73	85,54	14,46
Fundo	-	144,6	14,46	100	-
Total	-	1000	100	-	-

Fonte: Da Autora (2017).

Gráfico 3 - Curva granulométrica do resíduo de beneficiamento de ágata



Fonte: Da Autora (2017).

Por meio da Tabela 14, é possível identificar que o DMC para a amostra de resíduo de beneficiamento de ágata é 6,3 mm. E o valor de módulo de finura calculado resultou em 1,7056 mm. O MF, quando comparado à Tabela 3 (para agregado miúdo) se enquadra na Faixa 1, com granulometria muito fina.

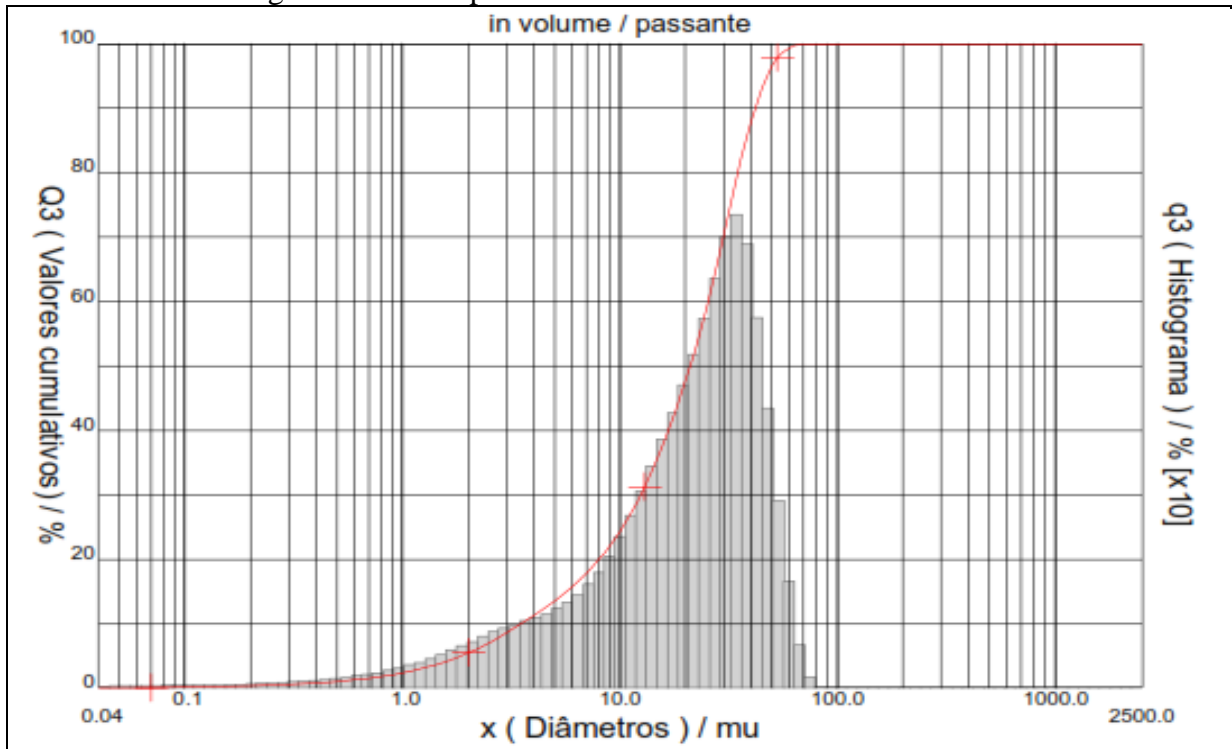
O MF muito fino implicou na análise granulométrica a *laser* para um conhecimento mais detalhado do diâmetro dos grãos. As características granulométricas do resíduo de beneficiamento de ágata encontradas pelo LACER da UFRGS estão dispostas de maneira resumida na Tabela 16, e a curva granulométrica no Gráfico 4.

Tabela 16 - Características granulométricas encontradas para o resíduo de beneficiamento de ágata por meio de análise com raio *laser*

Diâmetros encontrados μm					
10%	50%	90%	Média		
3,52	21,02	41,87	22,19		
Valores cumulativos particulares em volume passante					
Diâmetro μm	0,1	1	10	100	1000
Acumulado (%)	0,16	2,37	24,34	100	100

Fonte: adaptado dos resultados do LACER, 2017.

Gráfico 4 - Análise granulométrica por raio *laser*



Fonte: Resultados do LACER (2017).

A finura do resíduo é decorrente do processo de polimento em serra, e se aproxima da média de grãos de cimento que varia entre 10 e 50 μm (RIGO, 1998 apud SILVA, 2005). Do mesmo modo, encontra-se o resíduo proveniente do polimento de pisos porcelanatos, o qual, segundo estudo de Silva (2005, p. 97) possui: “diâmetro médio encontrado de 10,01 μm , sendo que 10% do resíduo está abaixo de 1,06 μm , 50% abaixo de 7,00 μm e 90% abaixo de 23,05 μm , confirmando ser um material bastante fino”.

A finura do material também é comprovada pela quantidade de material pulverulento presente no resíduo. Das 100 g analisadas, apenas 4,802 g não passaram na peneira de 0,075 mm, o que reflete uma porcentagem de 95,2% de material pulverulento.

O resultado encontrado para massa específica foi de 2,447 g/cm³; e o de massa unitária

está expresso na Tabela 17. O valor do primeiro parâmetro é superior, pois considera que o material preenche todo o volume de análise, ou seja, os vazios são desconsiderados.

Tabela 17 - Valores para ensaio de massa específica aparente com o resíduo de beneficiamento de ágata

Número do Ensaio	Resíduo de beneficiamento de ágata (g)	Volume do cilindro (cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
E - 1	3174,8	3229,96	0,982
E - 2	3188,2	3229,96	0,987
E - 3	3199,2	3229,96	0,990
Média			0,986
Desvio padrão			0,0026

Fonte: Da Autora (2017).

4.2.2 Índice de atividade pozolânica

Conforme o procedimento ensaiado pela NBR 5752 (ABNT, 2014), o desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias, chegou a 62,235%.

Assim, com o resultado de todos os ensaios de caracterização, tanto físicos quanto químicos, tornou-se possível verificar a capacidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de ágata. Os valores encontrados para as análises foram dispostos de maneira comparativa através da Tabela 18 com a “Classe E” dos materiais pozolânicos, cujos limites são descritos pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 18 - Valores característicos do resíduo de beneficiamento de ágata em comparação com referência da norma NBR 12653 (ABNT, 2014)

Requisitos químicos		
Propriedades	Referência para classe E (%) (novos materiais)	Resíduo de beneficiamento de ágata (%)
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 50	> 97,8
SO ₃	≤ 5	- ^a
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3 ^b
Perda ao fogo	≤ 6	1,95
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	0,07
Requisitos físicos		
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 µm	< 20	6,79
Índice de atividade pozolânico com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90	62,235

a) Não analisado pela FRX

b) Amostra seca em estufa com umidade próxima a zero

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014) adaptada com resultados da Autora (2017).

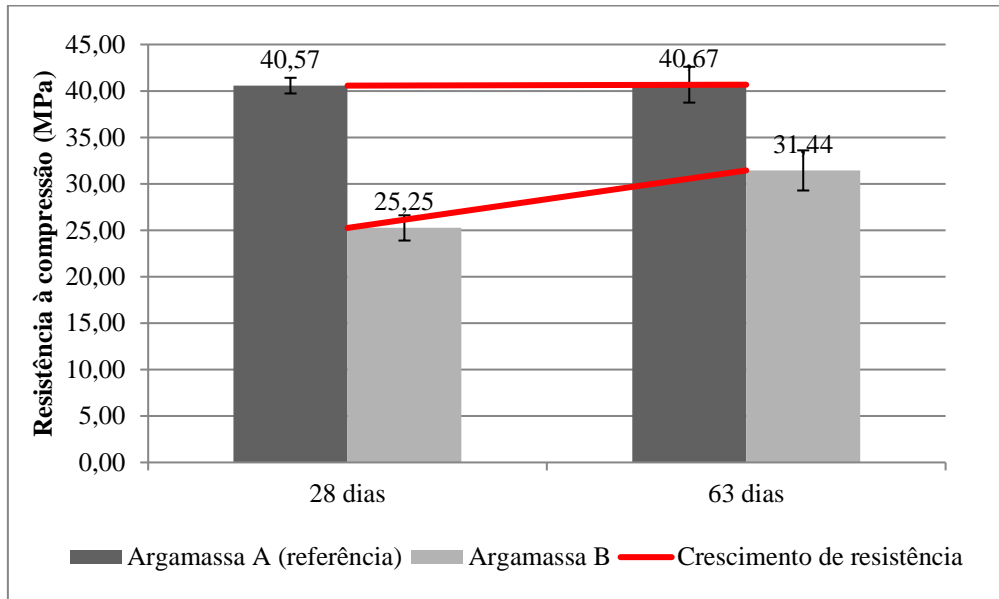
O valor de perda ao fogo, os álcalis disponíveis no Na₂O (óxido de sódio), e o somatório dos percentuais de SiO₂, Al₂O₃ (óxido de alumínio), Fe₂O₃ (óxido de ferro)

permitem enquadrar parcialmente o resíduo na classe das pozolanas. Porém, quando se tratam das características físicas, o material não atendeu ao índice mínimo de atividade pozolânica, mesmo contendo 6,79% de material retido na peneira de 45 μm . A mesma conclusão foi encontrada por Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) ao avaliarem a pozolanicidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, onde os finos compunham 70% da amostra entre 3 e 30 μm , no entanto não detinham capacidade pozolânica.

A razão para a baixa atividade pozolânica deve-se aos picos cristalinos de quartzo identificados pela análise mineralógica por DRX. Duart (2008) afirma que tais picos indicam a condição de inércia química, ou seja, o SiO_2 encontra-se sem fases quimicamente ativas. Tal condição impede a sua solubilização em água e consequente reação com o cálcio do hidróxido de cálcio, para a formação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) responsáveis pela aglutinação entre os agregados do concreto (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009).

A falta de atividade pozolânica do material impulsionou a segunda etapa desta pesquisa: substituição parcial da areia convencional na produção de concreto pelo resíduo de beneficiamento de ágata. Não obstante, antes disso, pautando-se na ideia de Cook (1986) apud Netto (2006) de que novas pozolanas podem apresentar ganho de resistência lentamente ao longo de maiores idades, o índice de desempenho também foi testado para a idade de 63 dias, para qual atingiu o valor de 77,32%. O valor ainda se manteve abaixo do mínimo de 90% estipulado para reações pozolânicas indicado pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Porém conforme o Gráfico 5, o crescimento de resistência entre as duas idades para a argamassa B se elevou em 24,51%, enquanto que a argamassa de referência manteve resistência na casa dos 40 MPa. O aumento da resistência pode ter ocorrido com o refinamento dos poros favorecido pela aproximação dos grãos de areia no estado plástico, o que em estado endurecido tornou o conjunto da argamassa mais denso e resistente (DUART, 2008).

Gráfico 5 - Resistência à compressão para diferentes idades do teste de desempenho com cimento *Portland*



Fonte: Da Autora (2017).

4.3 Características do concreto com resíduo de beneficiamento de ágata

Os resultados de desempenho do concreto com incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata, verificados tanto para o estado fresco quanto endurecido, estão indicados nos itens que seguem.

4.3.1 Consistência pelo abatimento

A redução do abatimento apresentada na Tabela 19 remete à menor trabalhabilidade da mistura de concreto ocasionada pela maior coesão das partículas.

Tabela 19 - Valores de consistência

Traço	Ref	5%	7,50%	10%	12,50%	15%
Abatimento (cm)	10	8,5	9	8,5	7	6
Aditivo superplastificante (%)	-	0,3	0,69	0,83	0,97	1,11

Fonte: Da Autora (2018).

A necessidade de maiores quantidades de aditivo proporcionalmente ao acréscimo da concentração do resíduo de ágata indica o aumento do consumo de água pelas partículas da mistura de concreto. Isso relaciona-se com a reduzida faixa granulométrica do resíduo incorporado, que em maiores quantidades compõem uma maior área superficial de partículas

absorventes, o que consequentemente aumenta o consumo de água para hidratação (SILVA, CAMPITELI, 2006).

4.3.2 Massa específica

As massas específicas de todos os traços de concreto, tanto em estado fresco quanto endurecido, se mantiveram dentro da variação usual para concretos comuns, a qual varia de 2,3 a 2,5 g/cm³ (BAUER, 2008). A Tabela 20 indica a redução deste parâmetro para o estado endurecido do concreto. Metha e Monteiro (2008) explicam que esta redução deve-se a perda de água para o meio ambiente durante a cura do concreto, e também ao consumo da água pelas reações de hidratação do cimento.

Tabela 20 - Massa específica do concreto

Estado	Traço	Ref	5%	7,50%	10%	12,50%	15%
Fresco	Massa específica (g/cm ³)	2,502	2,494	2,474	2,445	2,442	2,432
Endurecido	Massa específica (g/cm ³)	2,465	2,365	2,335	2,333	2,330	2,337

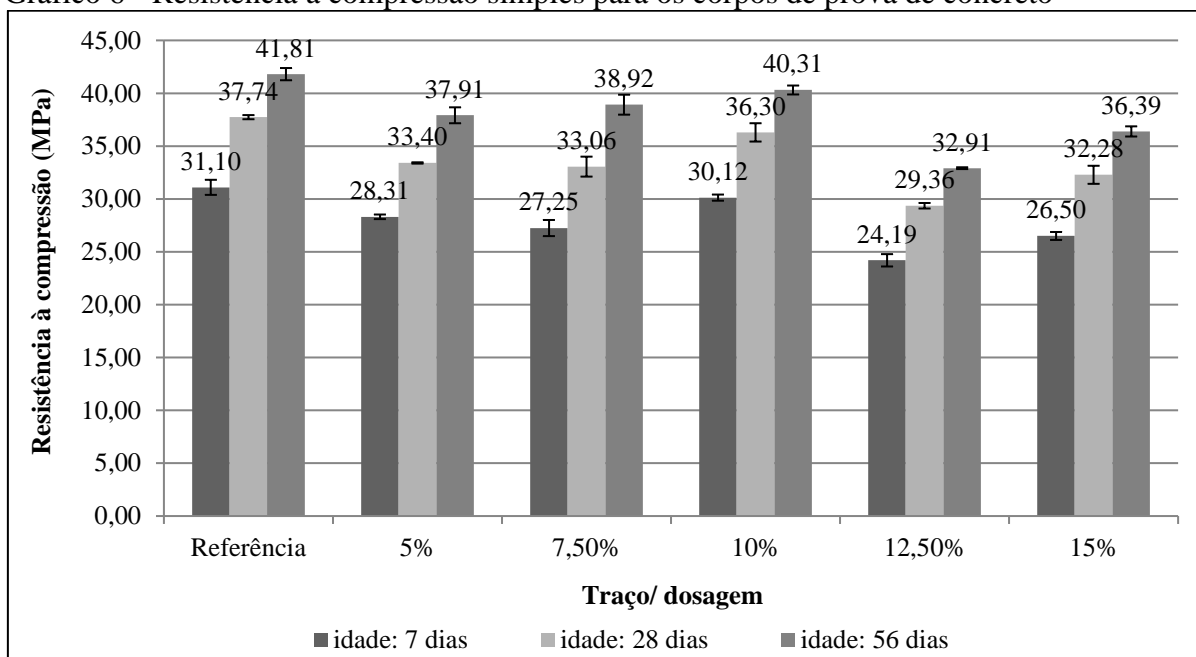
Fonte: Da Autora (2018).

Concretos testados com a incorporação adicional de resíduo de polimento de porcelanato, também resultaram na redução da massa de 2,62 para 2,45 g/cm³, sendo o primeiro para o traço de referência, e o último valor para adição de 50% do material de estudo (SOUZA, 2007).

4.3.3 Resistência à compressão simples

A resistência mecânica à compressão simples para as três idades de um mesmo traço e a comparação entre as resistências de todas as misturas de concreto está apresentada no Gráfico 6. Observa-se que nenhum traço com substituição da areia pelo resíduo de beneficiamento de ágata apresentou resistência superior ao traço de referência. Porém, entre os traços com substituição, a mistura com 10% de resíduo apresentou melhores resultados, com 96,4% de resistência correspondente ao traço referência. A variância das resistências para as três idades de análise, 7, 28 e 56 dias, foi, respectivamente de, 6,29, 8,88 e 9,83 MPa.

Gráfico 6 - Resistência a compressão simples para os corpos de prova de concreto



Fonte: Da Autora (2018).

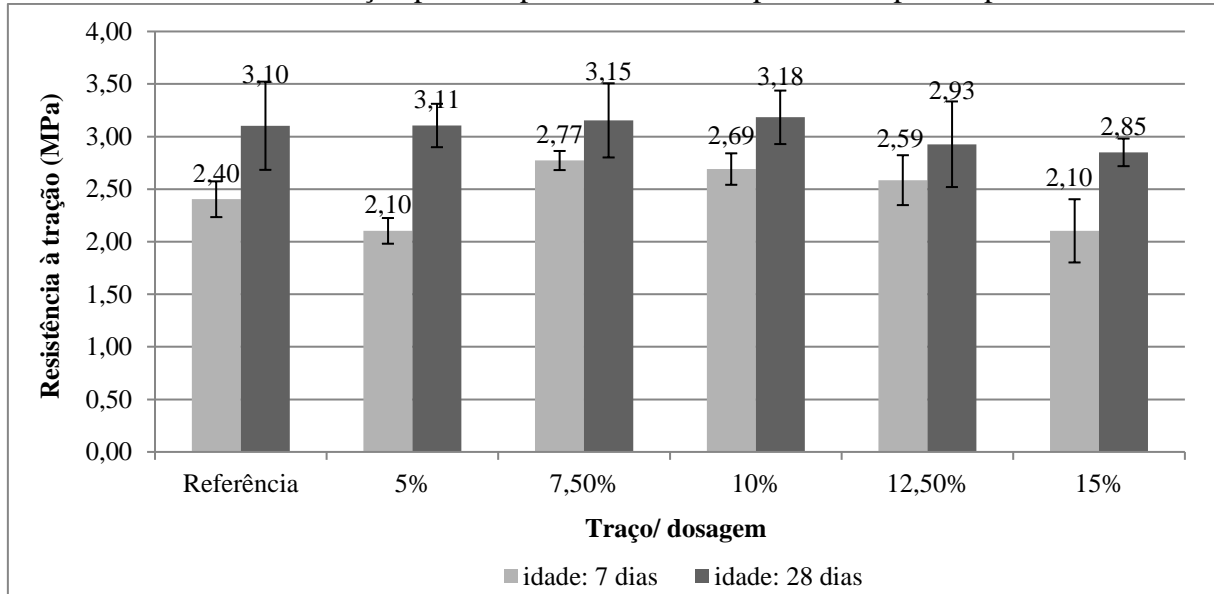
A partir do traço com 5% de resíduo nota-se um crescimento da resistência, em torno de 6%, ou 2,4 MPa, até a mistura com 10% do material, considerando análise para a idade de 56 dias; e um decréscimo para as misturas com 12,5%, e 15% de substituição na areia. A crescente inserção de finos na mistura pode ter atingido um valor ideal em 10%, melhorando o preenchimento dos vazios e o refinamento dos poros para incremento da resistência. Para Giovanella (2017) *pavers* com composição de 2% e 4% de resíduo de beneficiamento de ágata em substituição a areia fina, também obtiveram aumento de resistência, de modo que maiores porcentagens do resíduo também implicaram na redução da resistência (item 2.1.3 GRÁFICO 1).

4.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

O mesmo comportamento de crescimento de resistência até a substituição da areia por 10% de resíduo, e conseguinte redução até a substituição de 15%, também foi encontrado para as resistências de tração por compressão diametral. Porém, o Gráfico 7 aponta que os traços com 7,5 e 10% de resíduo apresentaram resistência final aos 28 dias de idade superiores à mistura de referência, com acréscimos na resistência de 1,6% e 2,58%, respectivamente. E, considerando valores de desvio padrão, todas as resistências de tração se equivalem em aproximadamente 3 MPa, quando analisados os concretos com 28 dias de idade. A variância

dos resultados para a idade de 7 dias foi de 0,084 MPa; e para 28 dias de 0,017 MPa.

Gráfico 7 - Resistência a tração por compressão diametral para os corpos de prova de concreto



Fonte: Da Autora (2018).

A redução na resistência para maiores substituições por material fino pode estar ligada a quantidade fixa de cimento e água de amassamento durante a mistura do concreto. Martins (2008) afirma que a medida que o teor de finos da mistura aumenta, maior deve ser a quantidade de pasta de cimento para preencher os vazios. Logo, como não houve incremento na pasta de cimento, a quantidade de pasta utilizada foi insuficiente para cobrir a área superficial de todos os agregados presentes na mistura, de modo que o preenchimento dos vazios ficou comprometido, o que consequentemente reduziu a resistência dos concretos com 12,5 e 15% de resíduo de beneficiamento de ágata.

No estudo de Souza (2007), ao incorporar como elemento adicional do traço de concreto o resíduo de polimento de porcelanato em teores de 10 a 50%, também observou um decréscimo de resistência a partir das misturas com 40% deste material. O autor indica que, mesmo com a utilização de aditivos plastificantes para a moldagem dos corpos de prova, a resistência tende a decrescer devido à dificuldade no adensamento do concreto o que decorre da falta de plasticidade da mistura.

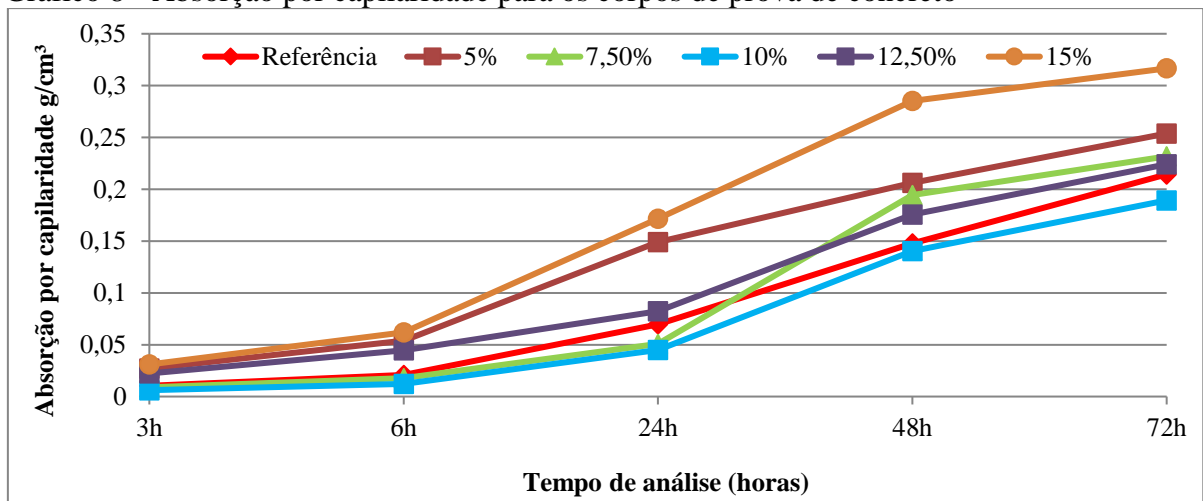
4.3.5 Capilaridade

A ascensão da água por capilaridade relaciona-se com a acomodação das partículas

dentro do concreto. Em sua maioria, o volume de penetração de água é também associado ao tamanho das partículas capilares, de modo que, quanto maior for a partícula, menor será a penetração da água (SILVA, 2006). Sendo assim, no Gráfico 8, os traços com porcentagens de resíduo de beneficiamento de ágata, exceto aquele com 10%, apresentaram valores de absorção por capilaridade superiores ao da mistura de referência. O fato ocorreu justamente pela composição da mistura com quantidades crescentes de material fino.

A redução de 11,71% de capilaridade para a mistura de 10% de substituição por resíduo, e a descontinuidade da mistura com 7,5% podem estar associadas à acomodação diferencial das partículas; ou com o melhor espalhamento das partículas dentro do concreto, onde, por motivos de adensamento ou trabalhabilidade, a lâmina da água de 5 mm pode ter estado em maior contato com as partículas de maior granulometria na base do corpo de prova.

Gráfico 8 - Absorção por capilaridade para os corpos de prova de concreto



Fonte: Da Autora (2018).

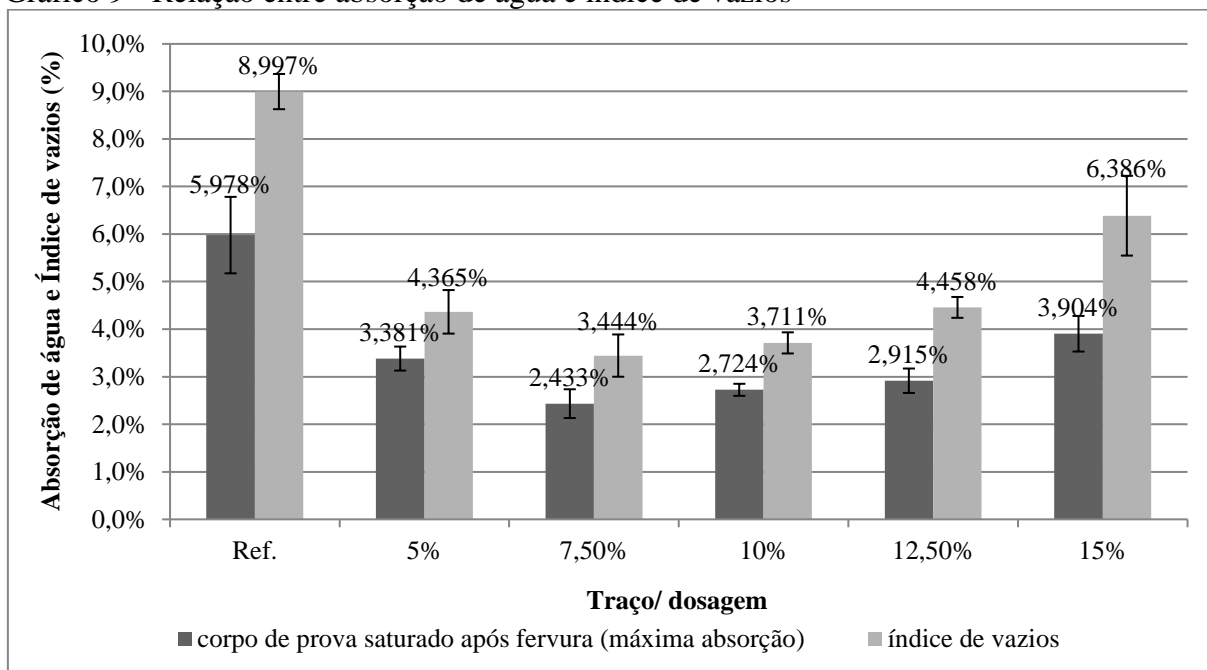
4.3.6 Absorção de água e índice de vazios (porosidade)

Silva e Campiteli (2006, p. 4256) afirmam que o “aumento do teor de finos provoca o empacotamento das partículas, e com isso, diminui o índice de vazios”. Neste contexto, os resultados indicados no Gráfico 9 vão ao encontro desta afirmação, pois nota-se que para todas as misturas de concreto com o aumento na quantidade de resíduo, houve a redução na capacidade absorvente, bem como a menor quantidade de vazios.

Os melhores resultados foram encontrados para as misturas com 7,5 e 10% de incorporação do resíduo de beneficiamento de ágata, com valores de redução de absorção

respectivamente de 59,3% e 54,43% quando comparados ao traço de referência. Novamente o crescimento do índice para os 12,5 e 15% tende a falta de pasta de cimento e limitação da quantidade de água na mistura, o que reduziu a eficiência no cobrimento superficial dos grãos de agregados, de modo a ocasionar a formação de vazios absorventes.

Gráfico 9 - Relação entre absorção de água e índice de vazios



Fonte: Da Autora (2018).

A absorção de água dos concretos está diretamente relacionada à sua durabilidade, sendo que quanto menor for este índice, menor também será a penetração de agentes agressivos (SOUZA, 2007). Neste contexto, verifica-se no Gráfico 9, que todas as misturas de concreto com substituição parcial da areia pelo resíduo de beneficiamento apresentaram melhores resultados (diminuição da absorção de água), logo tendem a contribuir para a maior durabilidade destes concretos. Nas misturas de concreto com resíduo de polimento de porcelanato de Souza (2007), também houve a redução da absorção concomitante ao decréscimo da porosidade, o que possibilitou direcionar o uso do concreto estudado para regiões com alta agressividade de meio.

A norma de ensaio para determinação da absorção de água, NBR 9778 (ABNT, 2009), também indica a verificação para absorção apenas por imersão. A comparação entre estes valores e os de absorção após saturação e fervura por 5 h, estão indicados na Tabela 21. O intuito da norma de ensaio, na explicação de Silva (2009), é proporcionar uma técnica mais incisiva, forçando a penetração da água no corpo de prova de concreto, por isso os valores

para absorção de água após a fervura são superiores.

Tabela 21 - Absorção de água em diferentes condições de saturação

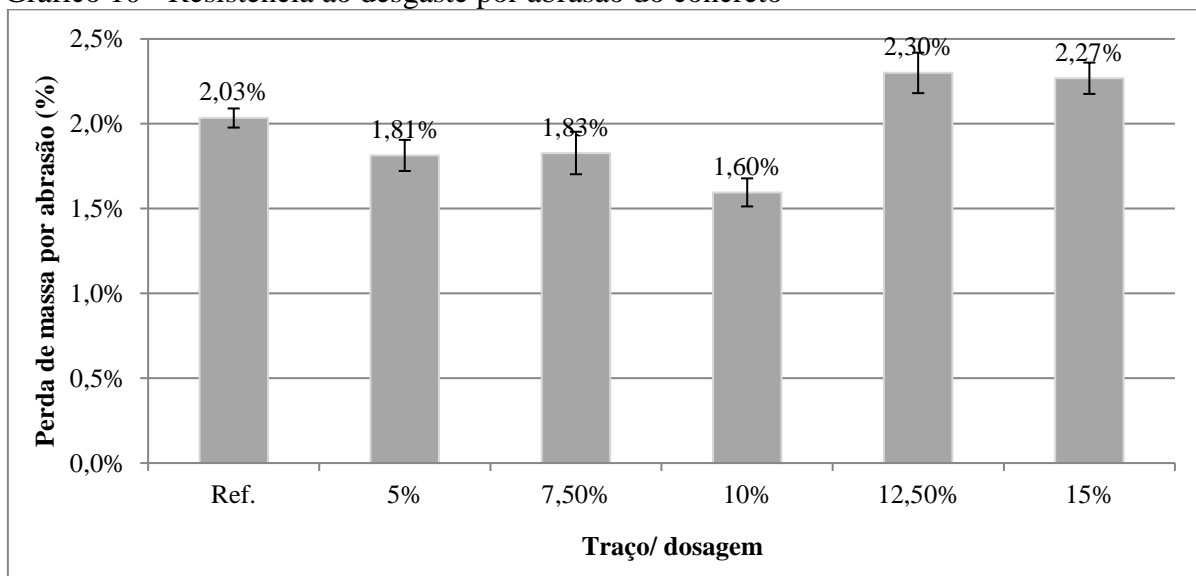
Condição	Traço	Ref.	5%	7,50%	10%	12,50%	15%
Saturado	Absorção (%)	3,650	1,846	1,475	1,591	1,914	2,733
Saturado após fervura	Absorção (%)	5,978	3,381	2,433	2,724	2,915	3,904

Fonte: Da Autora (2018).

4.3.7 Abrasão

Desconhecendo a resistência individual de cada agregado, areia, brita e resíduo de beneficiamento, adota-se a teoria de Singh e Hossain (1995 apud REBMANN, 2011) que diz que para uma mesma resistência de agregado, a abrasão segue a linha de que quanto mais resistente for o concreto e menor for o seu índice de vazios, menores serão as perdas de massa por desgaste. Ao que se observa no Gráfico 10, o resultado segue a teoria descrita pelo autor: os traços de 5, 7,5 e 10%, dentre os 5 com substituição da areia pelo resíduo, e ainda excluindo-se o traço referencial, apresentaram as maiores resistências à compressão simples e tração bem como as menores quantidades de vazios, consequentemente também resultaram em uma menor perda de massa por desgaste abrasivo (FIGURA 44).

Gráfico 10 - Resistência ao desgaste por abrasão do concreto



Fonte: Da Autora (2018).

Figura 44 - Perda de massa nos corpos de prova após ensaio de abrasão



Fonte: Da Autora (2018).

O menor desgaste também ocorre pela acomodação das partículas, que além da menor porosidade, também ocorre devido à granulometria contínua de agregados (apresentando desde agregados pulverulentos, até miúdos e graúdos). O preenchimento dos poros com diferentes tamanhos de grãos contribui para a homogeneidade do concreto, de modo a tornar o conjunto denso e mais resistente a perda de massa.

4.3.8 Indicação de óleo

O resultado para determinação da quantidade de óleo após o endurecimento do concreto não apontou valores significativos a fim de qualificar o produto final como causador de danos ambientais. Para a maior mistura de concreto com o resíduo de beneficiamento de ágata, 15%, o valor apontado foi de 0,809%; e para a menor quantidade de resíduo na mistura, 5%, o valor de óleo foi de 0,385%; sendo que para as outras porcentagens de substituição da areia pelo resíduo, variaram dentro destes dois limites.

Vários processos produtivos de elementos pré-moldados de concreto, estruturais ou não, podem apresentar certas quantidades de óleo mineral na face externa devido ao uso de desmoldante, mesmo após a limpeza das peças (MILANI, 2012). A diferença entre o óleo desmoldante e o óleo diesel é a quantidade de cadeias de hidrocarbonetos, porém ambos produtos são derivados do petróleo.

Melo (2013) verificou a influência da adição de resíduo de produção de óleo combustível no concreto. Os resultados para 5 e 10% de resíduo adicionado à mistura indicaram redução na capacidade de resistência mecânica, no entanto a capacidade de tração não se alterou quando comparados ao concreto referencial. Contudo, uma microanálise de

pedaços do concreto endurecido para estes traços não indicou a presença de metais pesados e hidrocarbonetos remanescente do processo produtivo do óleo. O autor afirma que o concreto desenvolvido pode destinar-se à aplicação em pavimentos e outras peças pré-moldadas de modo a reduzir o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado dos resíduos derivados do petróleo.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inexistência de pozolanicidade no resíduo de beneficiamento indica a ausência de propriedades aglomerantes dentro de misturas cimentíceas. Mesmo que alguns autores, como Duart (2008), e Cook (1986) *apud* Netto (2006), indiquem que as reações pozolânicas possam ocorrer ao longo de maiores idades, perante à NBR 12653 (ABNT, 2014) o resíduo não apresentou tais características. A partir desta constatação a pesquisa pôde seguir com o intuito de encontrar uma saída alternativa para o resíduo, como um agregado não convencional passível do emprego nos concretos de cimento *Portland*.

A granulometria fina do resíduo de beneficiamento de ágata, composto em sua maioria por material pulverulento, implicou na redução da trabalhabilidade do concreto à medida que a porcentagem de substituição se elevou. Mesmo não atingindo o valor de abatimento referencial, foi possível a moldagem dos corpos de prova para a verificação do desempenho no estado endurecido.

A resistência mecânica à compressão simples para os concretos com o resíduo de beneficiamento não foi superior ao traço referencial. No entanto, a mistura com 10% do material atingiu 40 MPa com 56 dias. Em relação aos esforços de tração, os traços com 7,5% e 10% do resíduo apresentaram as maiores resistência, inclusive sobre o concreto referencial.

A absorção de água por imersão e o índice de vazios, diminuíram proporcionalmente e gradualmente até a incorporação de 10% do resíduo de beneficiamento de ágata. Para as dosagens seguintes, 12,5% e 15%, os parâmetros se elevaram, porém, mantiveram resultados inferiores ao concreto de referência. Os resultados para perda de massa por abrasão apresentaram o mesmo comportamento: redução gradual até a mistura com 10%, e acréscimo

para as de 12,5% e 15% com o resíduo de beneficiamento de ágata. De modo que menores perdas de massa implicam em maiores resistências ao desgaste abrasivo. E ainda, para a absorção de água por capilaridade, apenas o traço com 10% do material apresentou redução.

Ou seja, os resultados indicam que a substituição da areia pelo resíduo pode ter atingido um valor ideal a 10%. Para os traços com maior quantidade do material, a granulometria fina dos agregados, somada à relação de água/cimento fixa, pode ter dificultado o cobrimento da área superficial das partículas decorrente da falta de pasta cimentícia. Tal fato implicou no aparecimento de vazios para as misturas de concreto com maior quantidade de resíduo. Já, para misturas com menores quantidades de resíduo, pode ter ocorrido o refinamento e preenchimento dos vazios, tornando o conjunto mais denso e homogêneo e favorecendo a obtenção de maiores resistências mecânicas.

A redução da absorção causada pelo preenchimento dos poros também associa-se com a durabilidade das estruturas. De modo que, quanto menor for a quantidade de espaços vazios, mais difícil será a entrada de agentes agressivos e menor também será a perda de massa (desgaste), a qual é responsável pela diminuição da seção das peças de concreto. Sendo assim, os resultados indicam que é possível utilizar o resíduo de beneficiamento de ágata de modo combinado com a areia, ou seja, como agregado miúdo, mesmo em pequenas porcentagens.

A possibilidade de reaproveitar os rejeitos do setor de beneficiamento de pedras contribui para o desenvolvimento sustentável. Sem a necessidade de estocagem no pátio das empresas, e sem o gasto com transporte e destinação em aterros, novas soluções podem ser encontradas, como a produção de peças de concretos não estruturais, *pavers*, dormentes, chapas de fachada ventilada, entre outros. Além disso, o resíduo de beneficiamento, quando em substituição aos agregados comumente utilizados na construção civil, contribui para a manutenção dos recursos naturais e a diminuição da exploração dos mesmos.

Pesquisas com a utilização de resíduos de beneficiamento é recente. Para pesquisas futuras pode ser investigado o desempenho para os traços com 12,5% e 15% desta vez com alteração da relação água cimento, para permitir a trabalhabilidade e cobrimento das partículas pela pasta cimentícia. Também por ser feita uma investigação mais detalhada, por meio de análises microestruturais, se a granulometria fina do material exerce o efeito *filler* no concreto de modo a insistir na descoberta de novas possibilidades e garantir um destino cada vez mais sustentável para os resíduos de beneficiamento de pedras preciosas e semipreciosas.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Rayse Thaynare Oliveira; LIMA, Nelson Luiz de Andrade. **Adições minerais ao concreto:** melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida. Rio de Janeiro, 2014. p.57-66.
- AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção:** normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: PINI, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 1747:** Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion. PA: ASTM, 2013.
- ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Vanderley Moacyr. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção. São Paulo: IBRACON, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- _____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- _____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- _____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- _____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por

compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR NM 26:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 27:** Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BATISTI, Vanessa de Souza; TATSCH, Ana Lúcia. **O Arranjo Produtivo Local (APL) gaúcho de gemas e joias:** estruturas produtiva e comercial, arranjos institucional e educacional e relações interorganizacionais. v.33, n.2, Porto Alegre: Ensaios FEE, 2012. p.513-538.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BEDIN, Marcos Felipe Maule. **Remoção da fração líquida (óleo e graxa) presente no resíduo de serragem de ágatas por prensagem.** 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso

de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BENINI, Humberto; HARTMANN, Carine; JEKNAVORIAN, Ara; SILVA, Denise. Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1., São Paulo: IBRACON, 2011. p.347–380.

BILDHAUER, Deise Cristina; BRUXEL, Fernando Roberto; SANTANA, Eduardo Rodrigo Ramos de; OLIVEIRA, Eniz Conceição. Tijolos maciços com características refratárias a partir da incorporação de resíduo de mármore e granito. **Revista Liberato**. v.16, n.25, 2015.

BRUXEL, Fernando Roberto; OLIVEIRA, Eniz Conceição; STÜLP, Simone; MULLER C. S.; ETCHEPARE, Hélio D. Estudo da adição de resíduo (lodo) de gemas na massa cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**, n.58, 2012. p.211–215.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. NTS 005: **Óleos e graxas – Método de ensaio**. São Paulo: SABESP, 1997.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios**. v.32, n.1, Rio de Janeiro: Química Nova., 2009. p.82-86.

COSTA, Rodrigo Morem; JORNADA, Maria Isabel H. **O Arranjo Produtivo Local (APL) de pedras, gemas e joias do Alto da Serra do Botucaraí – Rio Grande do Sul (RS)**. Porto Alegre: FEE, 2013.

COSTA, Manfred. **Beneficiamento de pedras preciosas no Vale do Taquari – Diagnóstico e modelo para análise e redução de perdas nos processos produtivos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto alegre, 2007.

COSTENARO, Alessandra. **Indústrias de pedras preciosas: um estudo dos fatores competitivos em empresas de Soledade - RS**. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências Sociais e Humanas. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. Santa Maria, 2005.

DAL MOLIN, Denise Carpena. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.1, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 361–310.

DUART, Marcelo Adriano. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

GCP Applied Technologies. Disponível em: <www.gcpat-tools.com/construction/pt-br/Documents/TEC-FLOW_2015.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2018.

GIOVANELLA, Cristiano. **Reutilização do lodo remanescente do processo de beneficiamento de gemas na fabricação de pisos intertravados de concreto**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento. Universidade do Vale do Taquari, UNIVATES. Lajeado, 2017.

GRUPO MC-BAUCHEMIE. Disponível em: <www.mc-bauchemie.com.br/produtos/mc-para-industria-do-concreto/aditivos-para-concreto-e-argamassa/superplastificantes-pce/>. Acesso em: 2 abr. 2018.

GUZZO, Pedro Luiz. Quartzo. In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando. **Rochas e Minerais Industriais**. Capítulo 31, 2. ed., Rio de Janeiro: Cetem, 2009. p.681-721.

INTERCEMENT Brasil. Disponível em: <http://brasil.intercement.com/ProdutosServicos/detalhes_cimento/14>. Acesso em: 2 abr. 2018.

JOHN, Vanderley Moacyr. Concreto Sustentável. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2, São Paulo: IBRACON, 2011. p.1843–1870.

JUCHEM, Pedro Luiz. *et al.*. **Potencial gemológico da região sul do Brasil**. In: I Seminário sobre Design e Gemologia de Gemas, Gemas e Jóias do Rio Grande do Sul. Soledade - RS 2009.

MARTINS, Paulo Benjamim Morais. **Influência da granulometria agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. 2008. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, Michael de. **Estudo da Influência da Adição de Resíduos de Óleo em Concretos para Aplicação em Pavimentos**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira (SP), 2013.

MILANI, Cleovir José et al. Processo produtivo de elementos pré-moldados de concreto armado: detecção de manifestações patológicas. **Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, Programa de Pós-graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo Iau - USP, São Paulo, v.1, n.1, p.82-91, 2012.

NETO, Claudio Sbrighi. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.1, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 233–260.

NETTO, Rafael M.. **Materiais Pozolânicos**. 2006. 149 f. TCC (Graduação) - Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PAPINI, Claudemir J.; LEAL NETO, Ricardo Mendes. **Análise granulométrica de pós metálicos por difração de laser via seca**. In: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu – PR, 2006, p. 5024-5035.

PAULA, Marcos Oliveira de. *et al.*. Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa - MG, v.17, n.1, p.15-20, jan/fev. 2009.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem.** Revista Concreto. n.53. São Paulo: IBRACON, 2009. p.14-19.

PEREIRA, Adriana Maria. et al.. **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz.** Revista Matéria v. 20, n. 01, 2015, p.227-238.

PETRUCCI, Eládio G. R.; PAULON, Vladimir Antonio. **Concreto de cimento Portland.** 13. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1998.

QUARCIONI, Valdecir Angelo; DE CASTRO, Alessadra Lorenzetti. **Aditivos ao cimento.** Revista notícias da construção. São Paulo, 2013, p.44-45.

REBMANN, Markus Samuel. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.** 2011. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SCHUMANN, Walter; FRANCO, Rui Ribeiro; DEL REY, Mario. **Rochas e minerais: minerais, gemas, rochas, minérios, mais de 300 fotos coloridas.** Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1994.

SILVA JÚNIOR, F. A.. et al. **Concreto com resíduo de borracha de pneu e brita granítica.** In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – RN, 2016.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato.** 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

SILVA, Narciso Gonçalves da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Construção Civil – PPGCC/UFPR, Setor de Tecnologia. Curitiba – PR: Universidade Federal do Paraná, 2006.

SILVA, Narciso Gonçalves da; CAMPITELI, Vicente Coney. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas.** In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC). Florianópolis - SC, ago/2016. p. 4349-4358.

SILVA, Narciso Gonçalves da. et al.. Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia. **Anais: 51º Congresso Brasileiro de Concreto.** IBRACON, out/2009.

SILVA, Rodrigo de Almeida. SCHNEIDER, Ivo André H. Geração de resíduos no processo de ágatas. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v.1, n.2, 2015. p.11-16.

SINDELAR, Fernanda Cristina Wiebusch; BARDEN, Julia Elisabete; STÜLP, Simone. **Análise da Geração de Resíduos em uma indústria beneficiadora de gemas: um estudo de caso visando o reuso.** In: *International Workshop Advances in Cleaner Production*. São Paulo, 2013.

SOUZA, Júlio Cézar de. **Industrialização de ametista no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 1996.

SOUZA, Paulo Alysson Brilhante Faheina de. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 232 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.